



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

PABLO YUGO YOSHIURA KUBO

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO CARREGAMENTO
VERTICAL DINÂMICO APLICADO AO PAVIMENTO
BRASILEIRO PELA SUSPENSÃO DIANTEIRA DOS
VEÍCULOS COMERCIAIS**

CAMPINAS

2015

PABLO YUGO YOSHIURA KUBO

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO CARREGAMENTO
VERTICAL DINÂMICO APLICADO AO PAVIMENTO
BRASILEIRO PELA SUSPENSÃO DIANTEIRA DOS
VEÍCULOS COMERCIAIS**

Tese de Doutorado apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura
e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Civil, na
área de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA PELO ALUNO PABLO YUGO YOSHIURA
KUBO E ORIENTADO PELO PROF. DR. CÁSSIO EDUARDO
LIMA DE PAIVA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

A handwritten signature in blue ink, reading "Cassio Paiva", is written over a horizontal line.

CAMPINAS

2015

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

K951a Kubo, Pablo Yugo Yoshiura, 1978-
Análise quantitativa do carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento Brasileiro pela suspensão dianteira dos veículos comerciais / Pablo Yugo Yoshiura Kubo. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Cassio Eduardo Lima de Paiva.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Pavimentos. 2. Veículos - Transporte - Brasil. 3. Fadiga. I. Paiva, Cassio Eduardo Lima de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Quantitative analysis of the vertical dynamic load applied to the Brazilian pavement by the front suspension of the commercial vehicles

Palavras-chave em inglês:

Pavements

Vehicles - Transport - Brazil

Fatigue

Área de concentração: Transportes

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Cassio Eduardo Lima de Paiva [Orientador]

Jorge Luiz Alves Trabanco

Pablo Siqueira Meirelles

Roberto Spinola Barbosa

Washington Peres Núñez

Data de defesa: 14-12-2015

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**ANÁLISE QUANTITATIVA DO CARREGAMENTO VERTICAL
DINÂMICO APLICADO AO PAVIMENTO BRASILEIRO PELA
SUSPENSÃO DIANTEIRA DOS VEÍCULOS COMERCIAIS**

Pablo Yugo Yoshiura Kubo

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva
Presidente e Orientador / UNICAMP

Prof. Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco
UNICAMP

Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles
UNICAMP

Prof. Dr. Roberto Spinola Barbosa
USP

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
UFRGS

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se
no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 14 de Dezembro de 2015

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos amores da minha vida! Meu filho Gustavo Kubo e
minha esposa Érica “Jun” Nishimoto.*

AGRADECIMENTOS

Assim como na Vida, um trabalho acadêmico nunca é fruto somente do esforço de uma única pessoa. Muitos são os obstáculos encontrados nesta longa caminhada, os quais são suplantados com muito trabalho, sorte e sobretudo o apoio de amigos, que não possuem interesse algum, além de ajudar.

Desta forma, inicio os meus agradecimentos à Deus por me guiar ao longo dos últimos 4 anos, sobretudo nesta fase final, onde fui colocado à prova por diversas vezes.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Cassio Eduardo Lima de Paiva, por ter confiado no meu potencial desde o início, mesmo sendo eu um Engenheiro Mecânico. Muito obrigado pela parceria e amizade!

Agradeço também aos meus atuais e ex-Gestores na Volvo do Brasil: Rafael Barreto, Santiago Moran, Helio Kubo e Alexandre Miura por acreditarem na importância do desenvolvimento acadêmico na formação dos Engenheiros. Ainda no âmbito corporativo, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos da Volvo-FVV.

À minha família, que agora após o segundo Doutorado começa a entender a importância desta conquista.

Ao amigo Ari Nardello pela troca de conhecimentos e angústias devido ao processo mútuo de Doutorado.

Ao meu fiel amigo Arthur Larocca que não mediu esforços em me auxiliar durante todo esse processo e que, por diversas vezes, me comoveu com tamanha dedicação.

Um especial obrigado ao meu filho Gustavo Kubo, que apesar dos 5 anos de idade compreendeu a necessidade da minha ausência em alguns momentos.

Finalizo os meus agradecimentos à minha companheira de 20 anos e melhor amiga: Érica “Jun”. Muito obrigado por continuar dobrando o meu pára-quedas! Sem você nada disso seria possível!

RESUMO

O modal rodoviário é a base do sistema logístico Brasileiro. Porém, apesar de sua importância, é caracterizada na sua maioria por pavimentos precários, sinalização em condições ruins e problemas de geometria das vias. Tal fato é agravado pela elevada idade média (13,6 anos) dos 1,5 milhão de veículos comerciais que trafegam nas rodovias.

Ao longo de quatro anos, foi desenvolvida uma instrumentação para um caminhão 8x2, com o intuito de aquistar o carregamento vertical aplicado ao pavimento, durante condições reais de rodagem do veículo.

As amplitudes de carregamento dos eventos transientes como curva, frenagem e buracos evidenciam a severidade dos veículos comerciais ao pavimento flexível, que em alguns casos podem duplicar o carregamento vertical estático. Em contrapartida, o índice de irregularidade longitudinal (IRI) de um pavimento em condições ruins gera, pelo menos, sessenta vezes mais dano à suspensão do veículo, quando comparado a um pavimento em boas condições.

Desta forma, se por um lado há a necessidade de uma melhor análise do correto dimensionamento do pavimento considerando o comportamento dinâmico do caminhão, alerta-se também para o fato de que as montadoras de veículos comerciais precisam considerar a influência das condições de manutenção do pavimento no desenvolvimento de seus produtos.

Palavras chave: Pavimentos; Caminhão; Fadiga.

ABSTRACT

Road transport is the basis for the Brazilian logistic system. Despite its importance, it is overall characterized with bad maintained pavements, road signs in bad conditions and geometric design problems. In addition of that, the total of approx. 1.5 million trucks have a high average age of 13.6 years.

Over the last four years, it has been developed an instrumentation for a 8x2 rigid truck, in order to measure the vertical load applied to the pavement, during real truck running conditions.

The loading amplitudes from the transient events such as corners, braking and potholes show the severity from the commercial vehicles to the flexible pavement, which in some cases could double the vertical static load. On the other hand, the international roughness index (IRI) of a pavement with bad maintenance condition generates, at least, sixty time more damage for the vehicle suspension, when compared to a pavement with good maintenance condition.

In this regard, at the same time that there is the necessity of a better analysis for the correct pavement design, this Thesis also alerts that the Trucks OEMs need to consider the influence of the pavement maintenance condition for its product design.

Key-words: Pavements, Truck, Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Classificação do pavimento.	18
Figura 1-2 - Classificação da sinalização.	19
Figura 1-3 - Classificação da geometria da via.	19
Figura 2-1 - Análise de forças atuantes no veículo durante curva.	27
Figura 2-2 - Afundamento de trilha de roda.	28
Figura 2-3 - Afundamento local.	29
Figura 2-4 - Ondulação.	30
Figura 2-5 - Escorregamento.	31
Figura 2-6 - Buraco ou "panela".	31
Figura 2-7 - Desenho esquemático: irregularidade longitudinal e transversal.	32
Figura 2-8 - Exemplos de aplicação de caminhões rígidos.	34
Figura 2-9 - Exemplos de aplicações de caminhões tipo cavalo mecânico.	34
Figura 2-10 - Desenho esquemático de um veículo 8x2 rígido.	35
Figura 2-11 - Modelo de 1/4 de veículo.	36
Figura 2-12 - Exemplo de uma suspensão do tipo eixo sólido.	38
Figura 2-13 - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola parabólica.	38
Figura 2-14 - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola semi-elíptica. ...	39
Figura 2-15 - - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola pneumática. ...	40
Figura 2-16 - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola metálica + pneumática.	40
Figura 2-17 - Desenho esquemático de uma suspensão primária – Amortecedor. ...	41
Figura 2-18 - Ilustração de um extensômetro metálico.	42
Figura 2-19 - Esquema do circuito elétrico da ponte de Wheatstone.	44
Figura 2-20 - <i>Strain gauges</i> em arranjo de ponte completa.	45
Figura 2-21 - Circuito de acelerômetro MEMS capacitivo.	46
Figura 2-22 - Perfilômetro inercial laser.	48

Figura 2-23 - Exemplo de um equipamento de aquisição de dados.....	49
Figura 3-1 - Veículo 8x2 rígido utilizado durante as medições.	53
Figura 3-2 - Curva de amortecimento.....	54
Figura 3-3 - Posição dos strain gauges.....	57
Figura 3-4 - Curva de calibração do primeiro eixo direcional	58
Figura 3-5 - Curva de calibração do segundo eixo direcional.	58
Figura 3-6 - Descrição da instrumentação, aquisição e pós-processamento dos dados – fotos ilustrativas dos sensores.	59
Figura 3-7 - Buracos avaliados.....	63
Figura 3-8 - Buraco com calço metálico - Nova profundidade: 40 mm.	64
Figura 3-9 - Perfilômetro laser instalado no caminhão de testes.....	65
Figura 3-10 - Exemplo de curva S-N de dois materiais distintos.	70
Figura 3-11 - Figura esquemática de um sinal senoidal para obtenção da curva S-N.	71
Figura 3-12 - Representação da regra de Palmgren-Miner.....	72
Figura 3-13 - Exemplo de sinal com elevado nível de variação.....	73
Figura 3-14 - Princípio básico da contagem de ciclo do tipo rainflow.	73
Figura 4-1 - Gráfico do carregamento vertical aplicado ao pavimento (toneladas) vs Velocidade do veículo em curva (km/h).	75
Figura 4-2 - Carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento durante frenagem.	77
Figura 4-3 - Valores de pico de carregamento durante os testes de frenagem.	78
Figura 4-4 - Carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento durante a passagem em um buraco.	80
Figura 4-5 - Valores de pico durante a passagem nos buracos - Segundo eixo direcional.	81
Figura 4-6 - Comparação entre Dano relativo e IRI - 174 km de medições.....	84
Figura 4-7 - Comparação entre Dano relativo e IRI - Trechos controlados.	85
Figura 4-8 - Exemplo da adição de frenagem (100%) em um trecho com IRI de 2,08 m/km.	86

Figura 4-9 - Exemplo da adição de curva (70 km/h) em um trecho com IRI de 2,08 m/km. 87

Figura 4-10 - Comparação entre Dano relativo e IRI - 174 km vs Trechos controlados..... 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Idade média dos veículos comerciais no Brasil.	20
Tabela 1-2 - Frota atuante no Brasil.	20
Tabela 2-2 - Tabela de correlação entre IRI e Condição do pavimento.	33
Tabela 3-1 - Parâmetros do modelo de 1/4 de veículo - Comparação entre valores da literatura e o veículo de teste.	55
Tabela 3-2 - Forças de amortecimento - Comparação entre valores da literatura e o veículo de teste.	55
Tabela 3-3 - Sumário dos sensores utilizados em cada um dos eventos.	60
Tabela 3-4 - ANOVA - Exemplo de tabela dos resultados.	67
Tabela 3-5 - Tabela da análise de variância (ANOVA).	68
Tabela 4-1 - Teste de Tukey - Frenagem.	78
Tabela 4-2 - Teste de Tukey - Buraco - Velocidade do veículo.	82
Tabela 4-3 - Teste de Tukey - Buraco – Profundidade do buraco.	82
Tabela 4-4 - Sumário dos maiores carregamentos para cada evento.	90
Tabela 4-5 - Comparação das faixas de IRI: Literatura vs Dados da Tese.	91
Tabela 4-6 - Nível de severidade (dano) em função do IRI.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ANFAVEA – Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

CAN – Controller Area Network

CNT – Confederação Nacional dos Transportes

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DETRAN – Departamento Nacional de Trânsito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes

ECE – Economic Commission for Europe

GPS – Global Positioning System

IRI – International Roughness Index

MEMS – Micro Electromechanical System

OECD – Organization for Economic Co-operation and Development

PBT – Peso Bruto Total

PBTC – Peso Bruto Total Combinado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações gerais	17
1.2 Objetivos	21
1.3 Hipóteses.....	21
1.4 Delimitações do estudo	22
1.5 Conteúdo da Tese	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Traçado das Rodovias e seus tipos	25
2.1.1 Tipos de rodovias e suas características geométricas	25
2.1.2 Curvas horizontais	26
2.1.1 Defeitos dos pavimentos (funcionais e estruturais)	28
2.1.1.1 Afundamento	28
2.1.1.2 Ondulação	29
2.1.1.3 Escorregamento	30
2.1.1.4 Buraco	31
2.1.2 Irregularidade longitudinal	32
2.1.2.1 <i>International Roughness Index</i> (IRI)	32
2.2 Veículos comerciais	33
2.2.1 Caminhões	33
2.2.2 Carregamento legal definido no Brasil	34
2.2.3 Modelo de ¼ de veículo	36
2.2.4 Tipo de Suspensões.....	37
2.2.4.1 Considerações gerais	37
2.2.4.2 Molas parabólicas	38
2.2.4.3 Molas semi-elípticas	39
2.2.4.4 Molas pneumáticas	39
2.2.4.5 Molas metálicas / pneumáticas	40
2.2.4.6 Amortecedores hidráulicos	40
2.4 Conceitos dos instrumentos utilizados.....	42
2.4.1 Extensômetros metálicos (Metal strain gauges)	42
2.4.2 Transdutores de aceleração (acelerômetro)	45
2.4.3 Protocolo CAN	47
2.4.4 Perfilômetro inercial laser.....	47

2.4.5 Equipamento de aquisição de dados	49
2.5 Carregamento vertical aplicado ao pavimento	49
3. METODOLOGIA	51
3.1 Considerações gerais	51
3.2 Classificação da pesquisa	52
3.3 Características do Veículo de Teste	52
3.4 Instrumentação	56
3.5 Condições de Medição	61
3.5.1 Curva horizontal	61
3.5.2 Frenagem veicular	62
3.5.3 Buraco no pavimento	62
3.5.4 Índice de irregularidade longitudinal (IRI)	64
3.6 Análise Estatística e Pós-tratamento dos dados	66
3.6.1 ANOVA	66
3.6.2 Teste de Tukey (HSD)	69
3.6.3 Cálculo de Dano Relativo	70
4. RESULTADOS	75
4.1 Curva horizontal	75
4.2 Frenagem veicular	76
4.3 Buraco no pavimento	79
4.4 Índice de irregularidade longitudinal (IRI)	83
4.5 Discussão dos Resultados	88
5. CONCLUSÕES	92
6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	94
REFERÊNCIAS	95
ANEXO 1	106
ANEXO 2	124
ANEXO 3	146
ANEXO 4	156
ANEXO 5	170
ANEXO 6	187

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA, 2006), “a indústria automobilística Brasileira nasceu com um caminhão”. De 1957 a 1960 os automóveis representavam uma pequena parcela da totalidade de veículos da época – dos 321,1 mil veículos comercializados no período, 49% eram caminhões, 35% utilitários e 16% automóveis. Em 1960, após intenso debate sobre vantagens e desvantagens do transporte ferroviário e rodoviário, o governo Brasileiro decidiu pela segunda alternativa. Dada as dimensões continentais do país, isto significaria intensa utilização de grandes caminhões movidos a diesel. A partir de então, teve início um enorme investimento na construção de estradas e o óleo diesel passou a ser subsidiado, resultando no desenvolvimento das empresas já instaladas no Brasil – caso da Mercedes-Benz do Brasil, bem como a entrada de novas montadoras: SAAB-Scania, International, Fiat e Volvo.

Neste contexto, Kubo (2009) enfatiza que um dos fatores de sucesso para o desenvolvimento da indústria automobilística de veículos comerciais no Brasil deve-se à priorização do modal rodoviário. Por outro lado, Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) afirmam que o tráfego desses veículos demonstra ser um desafio para o dimensionamento e manutenção das rodovias.

Segundo DNIT (2006), o pavimento é dimensionado em função do número equivalente de operações de um eixo simples e rodagem dupla com carga constante de 8,2 toneladas, para o período de projeto escolhido, assim os carregamentos dos eixos simples, tandem duplo e triplo são convertidos para o chamado eixo padrão.

O Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), através das resoluções 12/98, 184/05 e 62/98 regulamenta os limites para dimensões, peso bruto total, peso bruto combinado e peso por eixo, que devem ser observados para todos os veículos de carga que circulam nas vias terrestres.

De um modo geral, consideram-se os seguintes limites máximos por eixo:

- eixo isolado com rodado simples: 6 toneladas;
- eixo isolado com rodado duplo: 10 toneladas;
- eixo em tandem duplo com rodado duplo: 17 toneladas e,
- eixo em tandem triplo com rodado duplo: 25,5 toneladas.

A Confederação Nacional dos Transportes realiza anualmente um estudo sobre as rodovias Brasileiras. No relatório de 2014 (CNT, 2014), afirma que 62,1% da extensão total das rodovias analisadas (98.475 km) apresentam pavimento em estado regular, ruim ou péssimo – Figura 1-1.

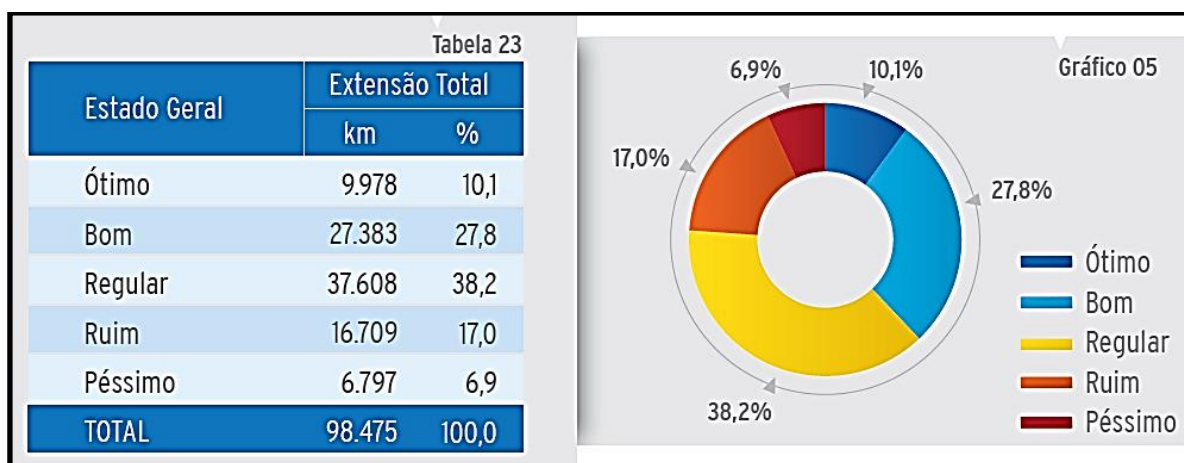


Figura 1-1 - Classificação do pavimento.
Fonte: CNT (2014, pg.65)

Referente à sinalização, vertical e horizontal, 57,4% da extensão total foi avaliada como regular, ruim ou péssima – Figura 1-2 – classificação baseada no Código de Trânsito Brasileiro (DETRAN, 2008).

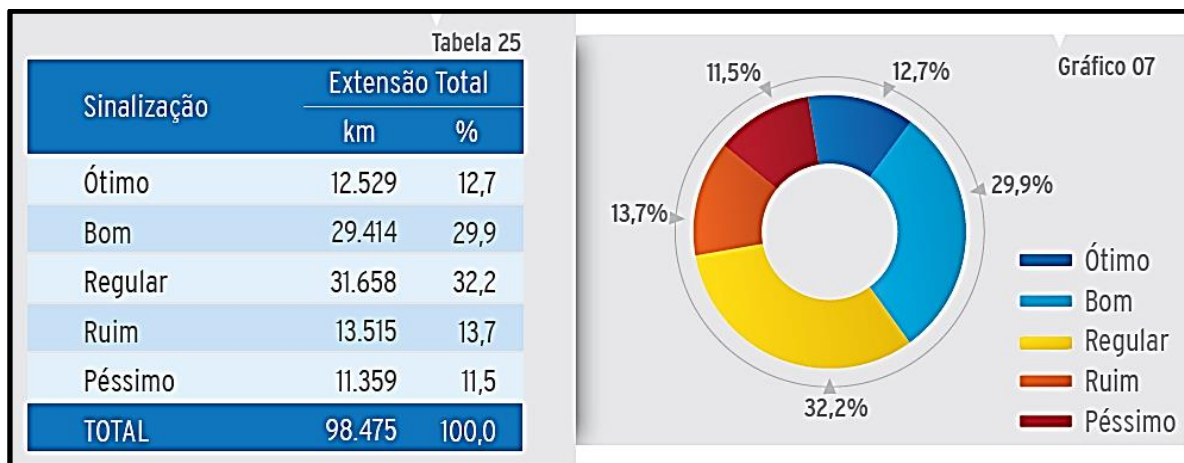


Figura 1-2 - Classificação da sinalização.
Fonte: CNT (2014, pg. 66).

Porém, o dado mais preocupante diz respeito à avaliação da geometria das vias Brasileiras, onde 77,9% de sua totalidade foram consideradas regular, ruim ou péssima – Figura 1-3.

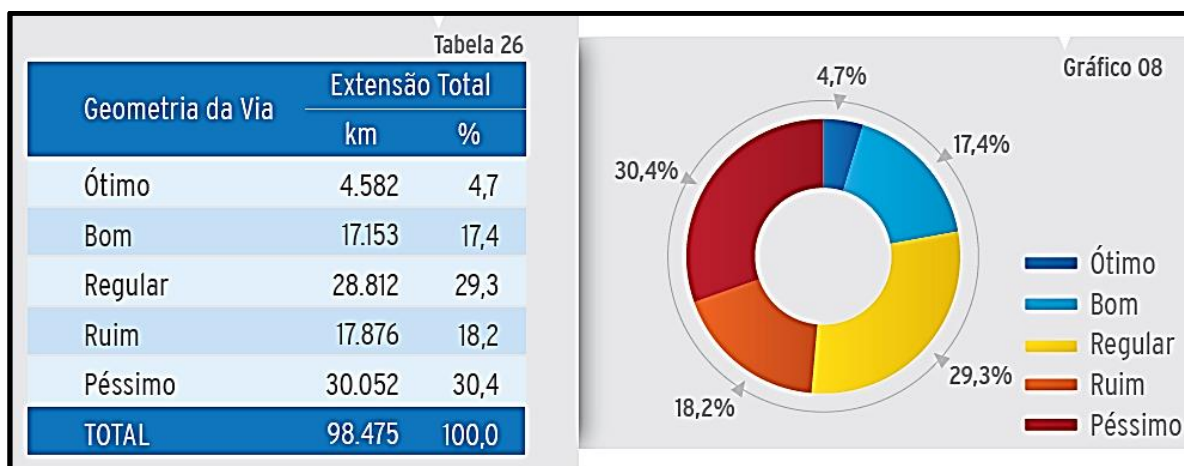


Figura 1-3 - Classificação da geometria da via.
Fonte: CNT (2014, pg. 66).

Por outro lado, um levantamento sobre acidentes nas rodovias federais Brasileiras (VOLVO, 2014), realizado entre 2008 e 2012, concluiu que apenas 0,8% dos acidentes fatais estão relacionados a defeitos na via – valores esses inferiores à ultrapassagem indevida (12,1%), velocidade incompatível (14,2%), desobediência à sinalização (5,0%), falta de atenção (19,3%) e não tomar distância segura do veículo à frente (1,6%).

Ressaltam-se ainda as condições de manutenção e a elevada idade média dos veículos comerciais que transitam por essas vias, bem como a frota de caminhões atuantes no Brasil, respectivamente apresentadas pela Tabela 1-1 e Tabela 1-2.

Tabela 1-1 - Idade média dos veículos comerciais no Brasil.

Tipo de veículo	Idade média dos veículos (anos)		
	Autônomo	Empresa	Cooperativa
Caminhão leve (3,5 à 7,99t)	20,7	9,8	10,6
Caminhão simples (8 à 29t)	24,1	11,2	16,0
Caminhão trator	18,5	8,2	14,1

Fonte: Adaptado de ANTT (2015).

Tabela 1-2 - Frota atuante no Brasil.

Tipo de veículo	Frota atuante – Quantidade de veículos		
	Autônomo	Empresa	Cooperativa
Caminhão leve (3,5 à 7,99t)	154.572	63.680	819
Caminhão simples (8 à 29t)	488.349	279.082	3.218
Caminhão trator	156.019	333.741	6.124

Fonte: Adaptado de ANTT (2015).

Diante do cenário acima exposto, parece oportuno o estudo do impacto causado pelos veículos comerciais ao pavimento, sob a ótica das condições das estradas Brasileiras, bem como questões referentes ao modo de condução dos caminhões pelos motoristas Brasileiros.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da Tese é estudar e analisar o impacto dinâmico vertical causado pelos veículos comerciais durante eventos transientes provenientes dos fatores da via, bem como o modo de condução dos veículos.

Para tanto, os objetivos específicos da Tese são:

1) Analisar quantitativamente o carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento em relação à aceleração longitudinal devido à frenagem e aceleração lateral em curvas;

2) Analisar quantitativamente o carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento ao se variar a profundidade e velocidade de passagem sobre “panelas”.

Adicionalmente como objetivo complementar, esta Tese tem como expectativa iniciar uma discussão acerca da influência da Irregularidade Longitudinal do pavimento (IRI) na durabilidade da suspensão dos veículos comerciais.

Por fim, como objetivo secundário, é proposta uma metodologia para levantamento de cargas verticais dinâmicas aplicada ao pavimento.

1.3 Hipóteses

A hipótese para cada objetivo específico é apresentada a seguir:

1) Espera-se uma maior incidência de carregamento vertical devido à transferência de carga longitudinal (frenagem) e lateral (curva);

2) A maior profundidade dos buracos também deverá ser um fator importante para o maior carregamento vertical aplicado ao pavimento;

3) Finalmente espera-se que a durabilidade da suspensão diminua com piores níveis de manutenção das rodovias.

Em uma primeira análise, tais hipóteses podem parecer triviais, porém a maior contribuição desta pesquisa será mensurar / quantificar a variação de tais parâmetros.

1.4 Delimitações do estudo

A seguir serão apresentadas as delimitações do estudo proposto:

- A variável em análise foi o carregamento vertical aplicado ao pavimento pelo caminhão, porém esta Tese não considerou a distribuição do mesmo devido à deformação do pneu; tema este amplamente discutido em outros estudos (DE BEER, FISCHER e JOOSTER, 1997; SIDDHARTHAN et al. 2002; KIM, SALGADO e ALTSCHAEFFL, 2005; LUO e PROZZI, 2006; COSTA, 2007; SOARES et al, 2008; CESBRON et al, 2008; WANG e AL-QADI, 2010; WANG e ROQUE, 2011).

- Para as medições foi escolhido um caminhão 8x2 (dois eixos direcionais, um trativo e outro “escravo”), devido a recente implantação dessa configuração nas estradas Brasileiras – maior possibilidade de carregamento nos eixos dianteiros – 12 tons ao invés de 6 tons com apenas um eixo direcional;

- Para o modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo, não foi analisada a influência da massa suspensa, uma vez que se trata de uma conclusão básica de que quanto maior a carga transportada, maior o carregamento sobre o pavimento. Além disso, não avaliou-se a variação de rigidez da mola, devido às limitações para a construção de protótipos;

- A instrumentação foi feita apenas nos eixos direcionais, pois esses são os que possuem maior carregamento por ponto de apoio (3 toneladas por rodado, enquanto que o eixo traseiro possui no máximo 2,5 tons por rodado). Além disso, 100% dos caminhões destinados ao mercado Brasileiro possuem suspensão

dianteira com molas metálicas, sendo a suspensão traseira dividida em metálica e pneumática. Vale ressaltar ainda que, segundo o relatório OECD (1998), a suspensão metálica causa mais dano ao pavimento do que a versão baseada em bolsas de ar;

- As informações sobre o carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento foram coletadas exclusivamente através das molas, para esses dados não considerou-se as forças dos amortecedores e,

- Algumas combinações de medição foram realizadas em um campo de provas, ou até mesmo não realizadas, devido às questões de segurança.

1.5 Conteúdo da Tese

Esta Tese, além da parte introdutória já apresentada, está dividida nos seguintes tópicos:

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica: referente aos conceitos utilizados no desenvolvimento desta Tese, dentre eles: Traçados das rodovias e seus tipos, Pavimentos, Veículos comerciais e análise de estudos referentes ao carregamento vertical aplicado ao pavimento;

- Capítulo 3: Metodologia: onde são apresentados a Classificação da pesquisa, Características do veículo de Teste, Instrumentação utilizada, Condições de contorno das medições (curva, frenagem, buracos e IRI), além de conceitos estatísticos sobre as ferramentas utilizadas: ANOVA, Teste de Tukey e Cálculo de dano relativo;

- Capítulo 4: Resultados: Cada uma das análises sugeridas anteriormente (curva, frenagem, buracos e IRI) foram apresentadas individualmente e ao final discutidas em conjunto;

- Capítulo 5: Conclusões;

- Capítulo 6: Sugestões para futuras pesquisas;
- Referências e,
- Anexos: este item contém a íntegra dos artigos submetidos às Revistas Internacionais, conforme apresentado a seguir:
 - Anexo 1: *“A review about methodologies to estimate vertical load applied to the pavement”*, submetido ao *Journal of Traffic and Transportation Engineering*;
 - Anexo 2: *“Methodology to quantify the real vertical load applied to the pavement”*, submetido ao *International Journal of Pavement Research and Technology*;
 - Anexo 3: *“Quantification of the vertical load applied to the pavement during cornering maneuver of a commercial vehicle”*, submetido ao *International Journal of Pavements*;
 - Anexo 4: *“Quantification of the vertical load applied to the pavement during braking maneuver of a commercial vehicle”*, submetido ao *Journal of Transportation Engineering*;
 - Anexo 5: *“Assessment of the vertical load applied to the pavement on pothole events”*, submetido ao *International Journal of Pavement Engineering* e,
 - Anexo 6: *“Quantitative analysis of the influence of pavement longitudinal profile for a front suspension’s durability of a commercial vehicle”*, submetido ao *Canadian Journal of Civil Engineering*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Traçado das Rodovias e seus tipos

2.1.1 Tipos de rodovias e suas características geométricas

De um modo geral, Robinson e Thagesen (2004) classificam as rodovias em 3 tipos distintos:

- rodovias de acesso: trata-se do menor nível hierárquico da malha rodoviária. Com um fluxo veicular baixo, suas características geométricas serão necessárias apenas para prover um acesso apropriado para as propriedades rurais e pequenos centros comerciais. Grande parte do fluxo de tráfego é dado por veículos não-motorizados;

- Rodovias coletoras: possuem a função de interligar o tráfego de áreas rurais com centros urbanos adjacentes, ou para uma malha rodoviária arterial. Tráfego de veículos possui nível moderado, assim não sendo tão importante as questões quanto a geometria da via e,

- Rodovias arteriais: tratam-se das principais rotas que conectam centros nacionais / internacionais, seu tráfego é derivado de rodovias de acesso e coletoras. O fluxo de veículos, bem como a duração das viagens, possuem níveis altos. Desta forma, torna-se essencial um bom projeto de geometria de via, para que a interação entre os veículos seja feita de forma adequada.

Diversas são as características geométricas de uma rodovia. Porém, devido ao tema desta Tese, será apresentado apenas o conceito de curvas horizontais.

2.1.2 Curvas horizontais

Durante uma curva circular, forças laterais de fricção são geradas através do contato dos pneus do veículo com a superfície da rodovia (ROBINSON e THAGESSEN, 2004). A relação entre o raio da curva, velocidade do veículo e a força lateral necessária para manter o veículo na sua trajetória é dada pela Equação (1):

$$R \geq V^2/[127(100e + f_s)] \quad (1)$$

Onde:

R: raio de curvatura (m);

V: velocidade do veículo (km/h);

e: inclinação transversal da rodovia (%) e,

f_s : coeficiente de atrito radial entre o pneu e a superfície da rodovia.

A superelevação é uma outra característica geométrica importante para as curvas horizontais e é obtida através da elevação da borda externa da curva em relação à linha de centro da seção. A mesma é recomendada para curvaturas de menor raio, onde os veículos podem trafegar em altas velocidades. Robinson e Thagesen ainda adicionam que os valores máximos de superelevação não devem exceder 10%, de modo a garantir a estabilidade do veículo em baixas velocidades e minimizar a possibilidade de capotamento dos veículos comerciais com elevado centro de gravidade.

Adicionalmente Gillespie (1992) detalha as forças atuantes em um veículo durante uma curva e denomina este fenômeno como rolagem - Figura 2-1.

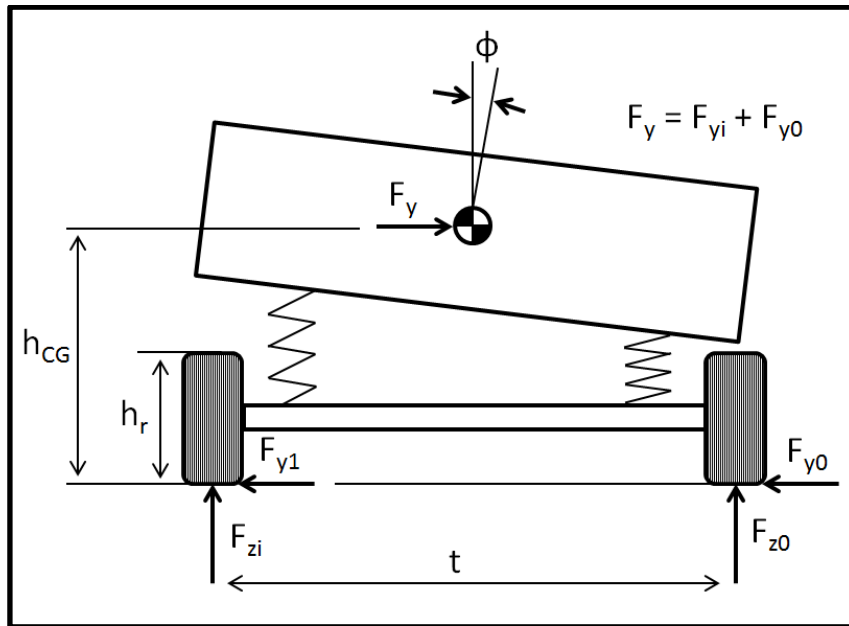


Figura 2-1 - Análise de forças atuantes no veículo durante curva.
Fonte: Adaptado de Gillespie (1992).

$$F_{z0} - F_{zi} = 2 \times F_y \times h_r / t + 2 \times K\phi \times \phi / t = 2 \times \Delta F_z \quad (2)$$

Onde:

F_{z0} : carregamento no conjunto roda / pneu externo à curva;

F_{zi} : carregamento no conjunto roda / pneu interno à curva;

F_y : força lateral;

h_r : altura do centro de rolagem;

h_{cg} : altura do centro de gravidade;

t : bitola do veículo;

$K\phi$: rigidez à rolagem da suspensão e,

ϕ : ângulo de rolagem da carroceria.

Resumidamente Gillespie (1992) afirma que a diferença do carregamento vertical entre a roda interna / externa será igual à soma da transferência de carga lateral, devido as forças oriundas da curva, bem como à rolagem do veículo.

2.1.1 Defeitos dos pavimentos (funcionais e estruturais)

Os pavimentos expostos ao tráfego, e ao clima, sofrem processo de degradação, representados por defeitos em suas camadas.

Segundo CNT (2013, pg. 35), o estado de conservação da superfície do pavimento é facilmente perceptível ao usuário da rodovia, uma vez que tais defeitos afetam diretamente o conforto e a segurança ao rolamento do tráfego, além de diminuir a durabilidade dos componentes veiculares.

A descrição dos defeitos nos pavimentos flexíveis a seguir foi baseada na norma do DNIT 005/2003 (DNIT, 2003).

2.1.1.1 Afundamento

O afundamento é caracterizado por deformação permanente representado por depressão da superfície do pavimento.



Figura 2-2 - Afundamento de trilha de roda.
Fonte: DNIT (2003, pg. 08).



Figura 2-3 - Afundamento local.
Fonte: DNIT (2003, PG. 08).

2.1.1.2 Ondulação

Trata-se da deformação caracterizada por ondulações ou corrugações transversais na superfície do pavimento.



Figura 2-4 - Ondulação.
Fonte: DNIT (2003, pg. 09).

2.1.1.3 Escorregamento

O escorregamento caracteriza-se pelo deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com a presença de fendas em forma de meia-lua.



Figura 2-5 - Escorregamento.
Fonte: DNIT (2003, pg. 09).

2.1.1.4 Buraco

Cavidade que se forma no revestimento por diversas causas, podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação das camadas – conhecido também como “panela”.



Figura 2-6 - Buraco ou "panela".
Fonte: DNIT (2003, pg. 11).

2.1.2 Irregularidade longitudinal

O relatório do Banco Mundial publicado em 1986 (SAYERS, GILLESPIE e QUEIROZ, 1986, pg. 01) define irregularidade longitudinal como as variações do nivelamento da superfície, tais como saliências e depressões, que induzem vibrações ao veículo, causando desgastes aos componentes do mesmo, influenciando o conforto e segurança dos passageiros. Além disso, adicionam que tal parâmetro está diretamente relacionado com o processo de deterioração do pavimento.

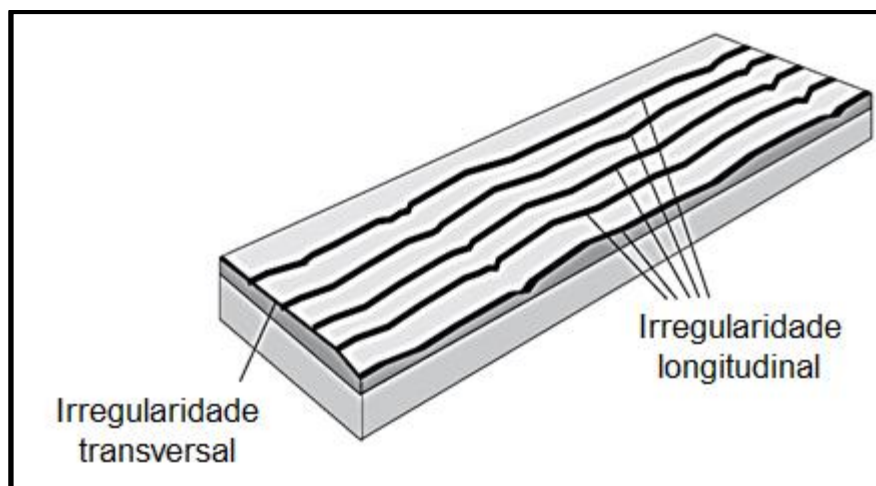


Figura 2-7 - Desenho esquemático: irregularidade longitudinal e transversal
Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas (1998, pg. 2).

2.1.2.1 *International Roughness Index (IRI)*

O estudo de Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) teve como objetivo estabelecer um índice mundial que traduzisse de maneira clara e objetiva o estado de irregularidade de uma superfície. A escolha desses Autores foi o IRI (*International Roughness Index*). Além disso, tal estudo, tinha como objetivo calibrar o equipamento de medição de irregularidade mais sofisticado na época: Medidor tipo resposta.

Sayers, Gillespie e Paterson (1986) recomendam o IRI como índice para as seguintes finalidades de análise:

- Custo operacional global do veículo;
- Conforto dos usuários;
- Forças dinâmicas das rodas aplicadas pelos veículos comerciais e,
- Condição global da superfície.

Sayers, Gillespie e Peterson (1986) e Bernucci *et al* (2010), definem as faixas de IRI para avaliar o estado superficial do pavimento de acordo com a Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Tabela de correlação entre IRI e Condição do pavimento.

Condição	IRI (m/km)
Boa	1,0 – 3,5
Regular	3,5 – 4,5
Ruim	> 4,5

Fonte: Adaptado de Sayers, Gillespie e Peterson (1986) e Bernucci *et al* (2010).

2.2 Veículos comerciais

2.2.1 Caminhões

Os caminhões podem ser divididos em duas categorias: rígidos e cavalos mecânicos (*tractors*). Os caminhões rígidos possuem um único chassi formado por duas longarinas que sustentam todo o veículo, além da carroceria onde são transportadas as cargas. Esse tipo de veículo possui diversas aplicações, porém nota-se a maior incidência do uso em centros urbanos e transporte de carga entre municípios vizinhos. Por outro lado, existem algumas outras particularidades como aplicação em condições fora-de-estrada – ex: mineradoras. Sua capacidade de carga é descrita com as siglas PBT (peso bruto total) e podem variar entre 5 à 31 toneladas.

Na Figura 2-8 é possível visualizar algumas aplicações de caminhões rígidos.



Figura 2-8 - Exemplos de aplicação de caminhões rígidos.
Fonte: Kubo (2009).

A outra categoria de caminhões é denominada de cavalos mecânicos, ou *tractors*, esses veículos também são sustentados por um chassi formado por duas longarinas, porém a principal diferença em relação ao caminhão rígido é o fato de possuir, pelo menos, um ponto de articulação na extremidade de seu chassi (“quinta-rodas”). Tal característica possibilita que esse tipo de veículo possa arrastar uma carreta acoplada que permite carregar uma quantidade maior de carga – o seu PBTC (peso bruto total combinado) pode variar entre 42 à 74 toneladas.

Na Figura 2-9 são apresentadas algumas aplicações de cavalos mecânicos.



Figura 2-9 - Exemplos de aplicações de caminhões tipo cavalo mecânico.
Fonte: Kubo (2009).

2.2.2 Carregamento legal definido no Brasil

O CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito), através das Resoluções 12/98, 184/05 e 62/98 regulamenta os limites para dimensões, peso bruto total, peso

bruto total combinado e peso por eixo, que devem ser observados para todos os veículos de carga que circulam nas vias terrestres nacionais.

De um modo geral, temos os seguintes limites máximos por eixo:

- eixo isolado simples: 6 toneladas;
- eixo isolado de rodagem dupla: 10 toneladas;
- eixo em tandem duplo: 17 toneladas e,
- eixo em tandem triplo: 25,5 toneladas.

Desta forma, está se tornando frequente a utilização de caminhões rígidos 8x2, que possuem dois eixos direcionais isolados, devido a sua maior capacidade de carga.

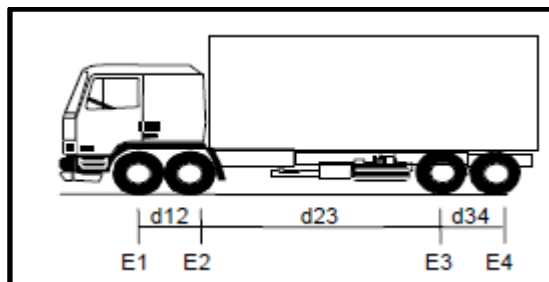


Figura 2-10 - Desenho esquemático de um veículo 8x2 rígido.
Fonte: Adaptado da Resolução CONTRAN 12/98 (DNIT 2012).

Na Figura 2-10 temos:

E1 e E2: conjunto de eixos direcionais – carga máxima: 12 toneladas;

E3 e E4: conjunto de eixos em tandem duplo – carga máxima: 17 toneladas e,

$1,20 \text{ m} < d34 < 2,4 \text{ m}$.

2.2.3 Modelo de 1/4 de veículo

Gillespie (1992) preconiza que todos os veículos, inclusive os caminhões e ônibus, podem ser descritos segundo o modelo denominado 1/4 de veículo – Figura 2-11. Segundo este Autor, o modelo consiste em uma massa suspensa suportada pela suspensão primária, que está conectada à massa não-suspensa do eixo. A suspensão possui rigidez e propriedades de amortecimento. O pneu é caracterizado como uma simples mola, porém em alguns casos específicos considera-se também o seu coeficiente de amortecimento.

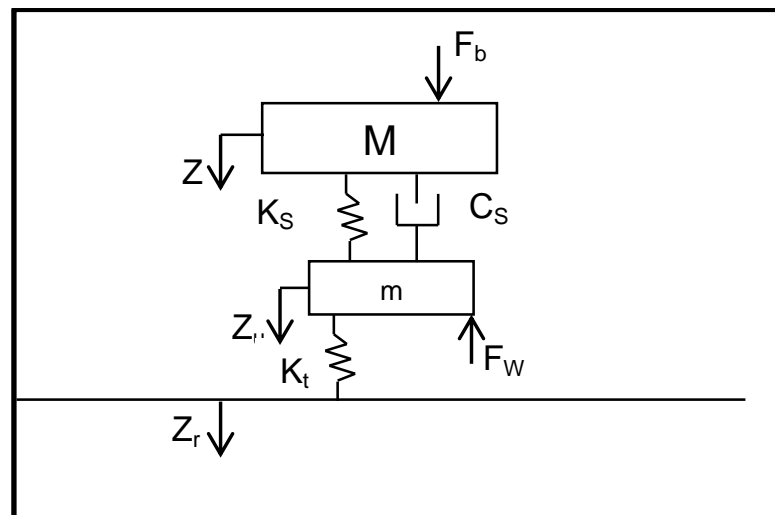


Figura 2-11 - Modelo de 1/4 de veículo.
Fonte: Adaptado de Gillespie (1992, pg. 147).

Onde:

M: massa suspensa (chassi do veículo e todos os elementos nele fixados);

Z: deslocamento vertical da massa suspensa;

F_b : distúrbio de força vertical da massa suspensa (ex: força aplicada durante frenagem);

K_s : rigidez vertical da suspensão (mola);

C_s : coeficiente de amortecimento da suspensão (amortecedor);

m : massa não-suspensa (eixo, roda e pneu);

Z_u : deslocamento vertical da massa não-suspensa;

F_w : distúrbio da força vertical do conjunto roda / pneu aplicado à massa não-suspensa;

K_t : rigidez vertical do pneu e,

Z_r : elevação vertical do pavimento.

Desta forma, é possível obter as equações diferenciais através da Segunda Lei de Newton (GILLESPIE, 1992, pg. 150) para a massa suspensa / massa não-suspensa – Equações 3 e 4, que servirão para analisar as vibrações resultantes nesses parâmetros produzidas pelas elevações do pavimento.

$$M\ddot{Z} + C_s\dot{Z} + K_sZ = C_s\dot{Z}_u + K_sZ_u + F_b \quad (3)$$

$$m\ddot{Z}_u + C_s\dot{Z}_u + (K_s + K_t)Z_u = C_s\dot{Z} + K_sZ + K_tZ_r + F_w \quad (4)$$

2.2.4 Tipo de Suspensões

2.2.4.1 Considerações gerais

De acordo com Gillespie (1992), praticamente todos os veículos comerciais possuem suspensão do tipo eixo rígido, dianteira e traseira. Pelo fato de possuírem o conjunto roda / pneu em suas extremidades, qualquer movimento sofrido por um desses conjuntos transmitirá uma força para o lado oposto em mesma intensidade. Tal característica pode resultar em problemas de estabilidade mas, por outro lado, devido a sua simplicidade, é utilizada mundialmente para aplicações com alto nível de carregamento.

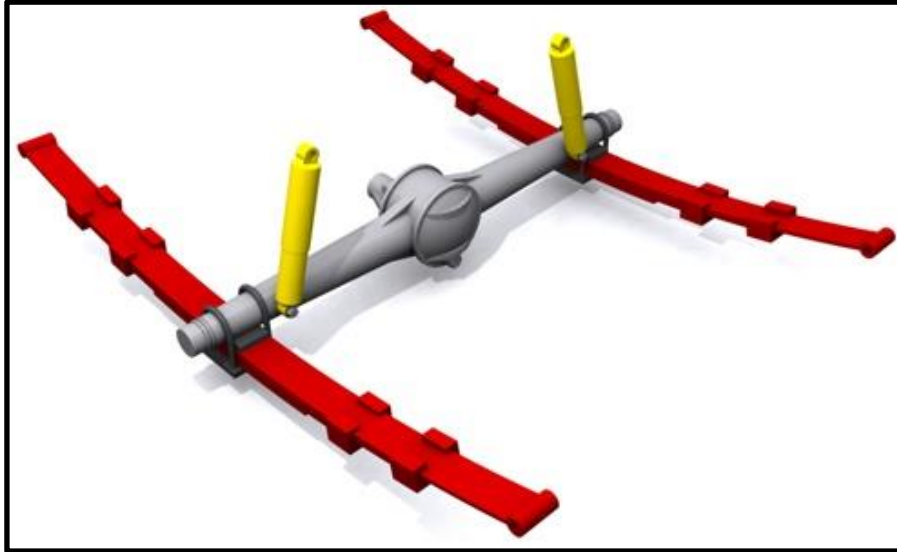


Figura 2-12 - Exemplo de uma suspensão do tipo eixo sólido.

As suspensões do tipo eixo sólido possuem 4 tipos de configurações, que serão apresentadas a seguir.

2.2.4.2 Molas parabólicas

A principal característica das molas parabólicas é ter níveis de tensão constantes em todo o feixe, evitando assim picos de tensão em alguma área específica, o que poderia causar falhas prematuras. Tais componentes são muito bem aceitos nos mercados Europeus e começam a figurar entre os caminhões que trafegam em países da América do Sul, como o Brasil.

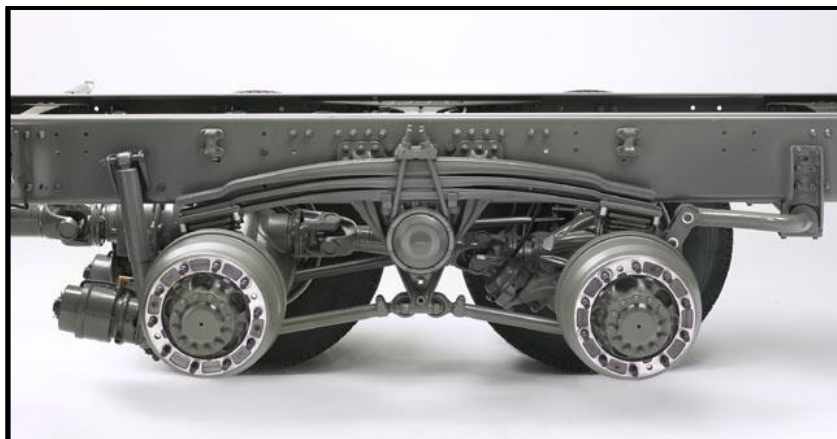


Figura 2-13 - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola parabólica.
Fonte: Volvo (2014).

2.2.4.3 Molas semi-elípticas

As molas semi-elípticas são recomendadas para usos severos, em mercados onde a sobrecarga é “aceitável” – comum em mercados da América do Sul, África e países Árabes.

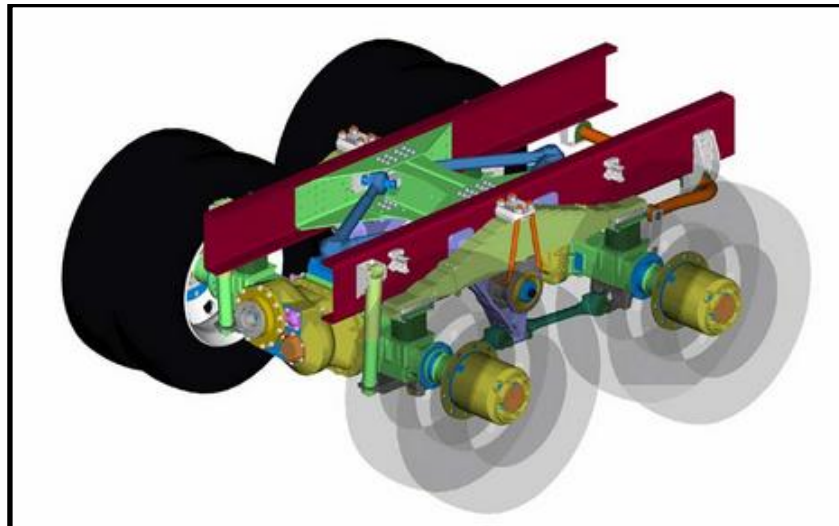


Figura 2-14 - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola semi-elíptica.
Fonte: Volvo (2014).

2.2.4.4 Molas pneumáticas

As molas pneumáticas são a melhor opção em termos de conforto para o motorista, devido a baixa rigidez da mola, se comparada com as versões metálicas. São recomendadas para pavimentos com boas condições de manutenção. Porém, um fator negativo é seu elevado custo.



Figura 2-15 - - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola pneumática.
Fonte: Volvo (2014).

2.2.4.5 Molas metálicas / pneumáticas

Trata-se de uma opção que possui um bom compromisso entre custo e conforto, mas também só é recomendada para aplicações com boas condições de pavimento, as molas metálicas e pneumáticas são dispostas em série.

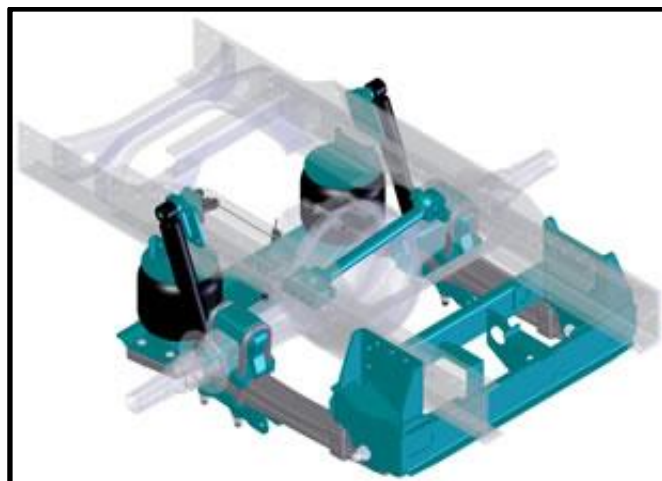


Figura 2-16 - Exemplo de suspensão do tipo eixo sólido com mola metálica + pneumática.

2.2.4.6 Amortecedores hidráulicos

Todas as três configurações de suspensão com eixos sólidos são montadas com amortecedores hidráulicos de duplo estágio (tração e compressão).

Segundo Causemann (2000), os amortecedores são montados em paralelo com as molas dos veículos e apresentam os seguintes aspectos:

- amortecem a vibração da massa suspensa causada por efeitos do pavimento, bem como condições do uso do veículo e,
- rápida anulação dos efeitos da vibração da massa não-suspensa de modo a garantir o contato entre o pneu e o pavimento e, conseqüentemente, a performance de estabilidade e frenagem.

Quando o veículo passa por uma lombada, as molas da suspensão primária e os amortecedores são comprimidos. Para estas condições, o amortecedor evita o contato entre a massa suspensa (m_2) – Figura 2-17 – e a massa não-suspensa (m_1). Adicionalmente essa mesma figura demonstra o comportamento de um sistema amortecido (linha vermelha), em comparação com uma condição sem amortecedor (linha azul).

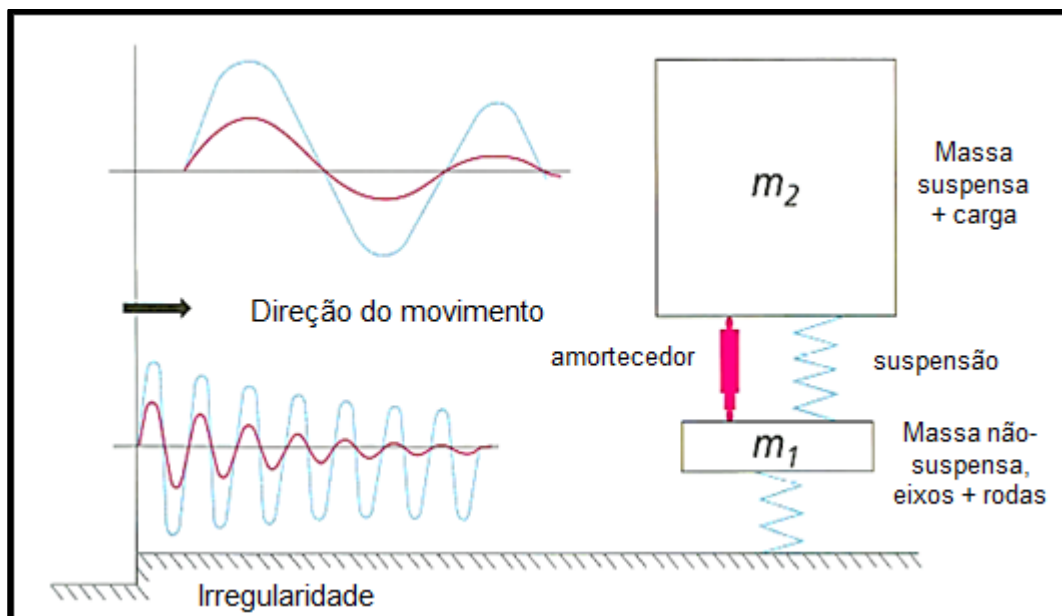


Figura 2-17 - Desenho esquemático de uma suspensão primária – Amortecedor.

Fonte: Adaptado de Causemann (2000).

2.4 Conceitos dos instrumentos utilizados

A seguir serão apresentados os conceitos básicos dos equipamentos utilizados durante as medições em campo.

2.4.1 Extensômetros metálicos (*Metal strain gauges*)

Os extensômetros metálicos, também conhecidos por extensômetros elétricos resistivos, são sensores compostos por uma fina lâmina metálica resistiva fixada em um material eletricamente isolado – usualmente poliamida ou resina epóxi-fenólico – chamado de base (ANDOLFATO *et al.*, 2004).

De acordo com Lima *et al* (1998), as principais vantagens e características dos extensômetros são:

- alta precisão e linearidade;
- baixo custo e peso;
- boa resposta dinâmica e estática e,
- utilização em grande faixa de temperatura e vibração.

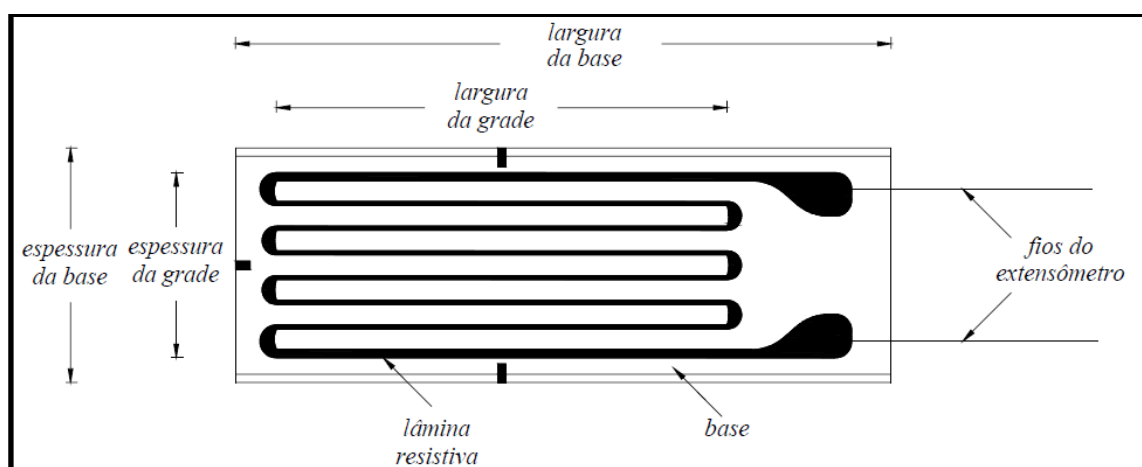


Figura 2-18 - Ilustração de um extensômetro metálico.
Fonte: Andolfato et al (2004).

O princípio de trabalho do extensômetro é baseado no fato de que todo condutor elétrico altera sua resistência ao ser deformado (GALLINA, 2003 pg. 12). Essa característica é prevista na Segunda Lei de Ohm, que relaciona a resistência (R) de um condutor à seu comprimento (L), à sua área de seção transversal (A) e à sua resistividade (ρ).

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (5)$$

Considerando uma deformação em um condutor qualquer, a partir da Segunda Lei de Ohm e de aspectos do extensômetro, Andolfato et al (2004) provam que:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k \Delta L}{L} \quad (6)$$

Onde o fator k é definido como a sensibilidade do extensômetro, correspondente à uma constante que varia em função do material resistivo utilizado. Seu valor varia entre 2 e 4, para a maioria das ligas metálicas empregadas, e não deve ter relação alguma com a magnitude da deformação medida (GALLINA, 2003 pg. 13; ANDOLFATO et al., 2004 pg. 7).

Sabendo que a deformação é uma grandeza adimensional, representada pela relação do alongamento do corpo (Δl) pelo seu comprimento inicial (l_0) (ANDOLFATO et al, 2004), temos a seguinte equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \epsilon \quad (7)$$

A equação 7 indica que a magnitude da deformação medida (ϵ) é proporcional à uma alteração relativa na resistência, sendo esse o princípio básico da medição com este tipo de sensor (ANDOLFATO et al., 2004).

A partir da mudança de resistência dos extensômetros, a leitura das deformações é feita através do circuito elétrico de uma ponte de Wheatstone. Isso se

deve à capacidade deste circuito em detectar as pequenas variações de resistência produzidas pelas deformações, por possibilitar a compensação de temperatura e também por permitir o ajuste da tensão (ANDOLFATO *et al*, 2004).

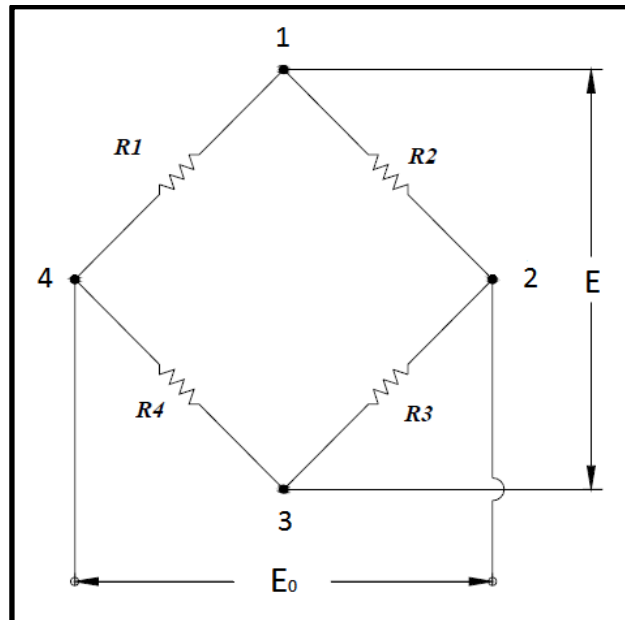


Figura 2-19 - Esquema do circuito elétrico da ponte de Wheatstone.

Fonte: Andolfato et al (2004).

A ponte de Wheatstone consiste em quatro braços resistivos ($R1$, $R2$, $R3$ e $R4$) alimentados por uma fonte de tensão, onde em cada braço podem ser ligados um ou mais extensômetros (RODRIGUES, 2012).

Diversas combinações de extensômetros e resistência são possíveis neste circuito ($\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte simétrica / assimétrica e ponte completa), cada qual com sua aplicação específica. A Figura 2-20 ilustra o arranjo de ponte completa.

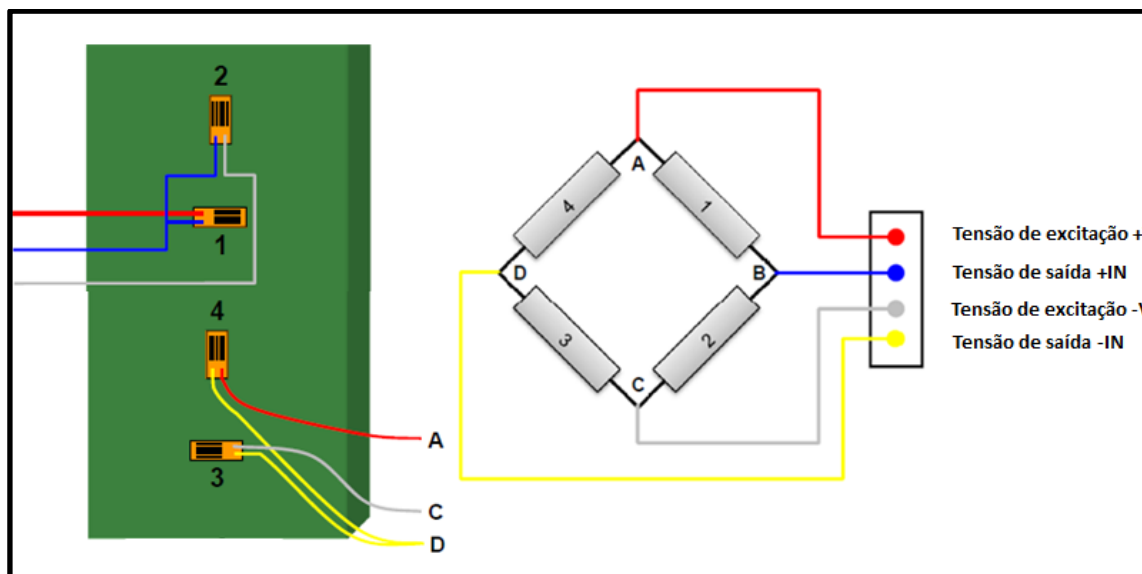


Figura 2-20 - *Strain gauges* em arranjo de ponte completa.
 Fonte: Adaptado de Andolfato et al (2004).

Finalmente, sendo os extensômetros metálicos colados à superfície de um material, estes experimentam deformações equivalentes àquelas sofridas pelo mesmo. O resultado é obtido relacionando a deformação à um sinal elétrico (analógico), que posteriormente será devidamente condicionado em um sistema de aquisição de dados (SILVA e ASSIS, 2012).

2.4.2 Transdutores de aceleração (acelerômetro)

Um transdutor de aceleração, popularmente conhecido como acelerômetro, é um dispositivo responsável por converter a aceleração, causada por um movimento mecânico ou pela própria força da gravidade, em um sinal elétrico. Esses sensores encontram aplicações nos mais diversos setores, como por exemplo no guiamento de mísseis militares, na manutenção preditiva e preventiva de máquinas e equipamentos industriais, em testes de colisão e mecanismos de ativação de *airbags* na indústria automotiva e até mesmo na área da saúde, como na avaliação de movimentos humanos e distúrbios do sono. (RODRIGUES *et al*, 2010).

Além de aceleração, tais transdutores são capazes de mensurar grandezas como força, inclinação, rotação e colisão, as quais possuem aplicações nas áreas da Eletrônica e Robótica (AGUIAR, 2011).

Os acelerômetros possuem uma massa conhecida, ligada e suspensa por uma estrutura estacionária. Ilustrativamente, este sistema pode ser simplificado ao modelo mecânico massa-mola, ou ainda massa-mola-amortecedor. Com tais parâmetros (rigidez e amortecimento do sistema) conhecidos, a partir da Segunda Lei de Newton, obtém-se a força e conseqüentemente a aceleração na base do transdutor de aceleração (CALACHE, 2013).

Apesar da unidade de aceleração do Sistema Internacional de Unidades (SI) ser em m/s^2 , neste trabalho será tratado a aceleração em níveis da constante “g”. Isto se deve a sua caracterização utilizada na indústria automobilística pela gravidade local, neste caso considerada $9,8 m/s^2$ (RODRIGUES, et al, 2010).

Existem diferentes tipos de acelerômetros, cada qual com suas características, vantagens e desvantagens.

Os transdutores utilizados no segmento automotivo são os mecânicos, como os acelerômetros capacitivos, piezoelétricos e piezoresistivos. Porém, nota-se a disseminação de uma nova linha de acelerômetros baseada na tecnologia MEMS (Micro Electromechanical System). Esses transdutores, fabricados com técnicas similares as dos circuitos integrados, possuem o princípio básico dos acelerômetros discretos, porém em uma escala reduzida (CALACHE, 2013).

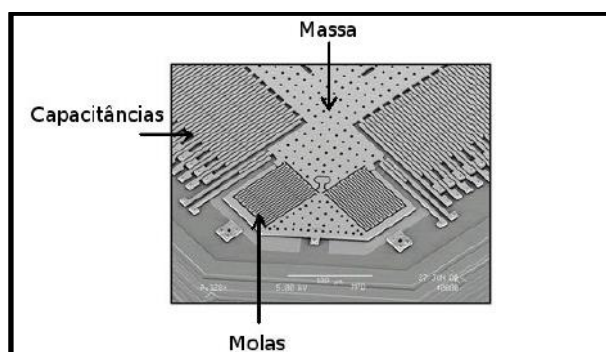


Figura 2-21 - Circuito de acelerômetro MEMS capacitivo.
Fonte: Calache (2013, pg. 17)

2.4.3 Protocolo CAN

Devido à simplicidade dos primeiros veículos nos primórdios da Indústria Automobilística, a conexão entre os diversos sistemas do veículo eram feitos por ligações discretas (ponto-a-ponto).

A exigência para a troca de informações entre os diferentes sistemas eletrônicos cresceu de tal forma que foram necessários cabos muito longos (quilômetros), bem como a utilização de um elevado número de conectores. Tal cenário gerou problemas relativos ao custo do produto, bem como maior tempo de produção do veículo, além da diminuição da confiabilidade do mesmo.

Segundo Nascimento (2006), o desenvolvimento do CAN (*Controller Area Network*) teve início quando da implementação de vários dispositivos eletrônicos no veículo, tais como: gerenciamento do motor, ABS, *airbag*, controle das luzes, etc.

O protocolo CAN foi desenvolvido na década de 1980 pela *Robert Bosch GmbH* (Alemanha). Para os veículos comerciais a SAE (*Society of Automotive Engineers*) padronizou o seu uso através da norma SAE J1939 (SAE, 2015).

Devido a troca de mensagens entre os diversos sistemas eletrônicos do veículo, é possível obter informações em tempo real tais como: velocidade, aplicação do acelerador / freio, potência, torque e todas as informações relativas ao motor e transmissão (temperatura, rotação, pressão, vazão, etc).

2.4.4 Perfilômetro inercial laser

Segundo Barella (2008) trata-se de um medidor de distância sem contato à base de *laser*, que mede continuamente a variação da distância entre a carroceria do veículo e o pavimento.



Figura 2-22 - Perfilômetro inercial laser.
Fonte: Barella (2008, pg. 29).

Caso fosse considerado apenas os módulos de laser, os resultados das imperfeições do pavimento não seriam confiáveis, tendo em vista o movimento da suspensão, descritas anteriormente no sub-capítulo sobre o modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo.

Por outro lado, somente a utilização de acelerômetros também não seriam o suficiente, pois estar-se-ia medindo a movimentação relativa da carroceria do veículo em relação ao pavimento. Além disso, a resposta da suspensão após passar em um evento (ex: buraco ou lombada) poderia influenciar os resultados após vários metros, dependendo das forças de amortecimento – conceito brevemente apresentado no sub-capítulo referente à amortecedor hidráulico.

Desta forma, Barella (2008) enfatiza a necessidade da utilização de ambos os sensores, uma vez que o o perfil das irregularidades longitudinais seriam a resultante entre a subtração das variações de elevação no pavimento obtidas pelo módulo laser e a oscilação da suspensão do veículo proveniente dos acelerômetros. Adicionalmente o Autor afirma que tais medições, neste caso, podem ser realizadas com velocidade normal de tráfego.

2.4.5 Equipamento de aquisição de dados

Com o intuito de sincronizar, em relação ao tempo, todos os dados dos diversos sensores (*strain gauges*, acelerômetros, perfilômetro *laser*), faz-se necessário a utilização de um equipamento de aquisição de dados que, além da função de integrador dos dados, também possui um amplificador interno de sinais, de modo a aumentar a resolução das informações coletadas.

Tal equipamento é configurado de acordo com a necessidade do teste e pode ser operado através de uma interface com computador, dispositivo pessoal (celular ou *tablet*), bem como a possibilidade de uma medição autônoma (*stand-alone*). Geralmente possuem módulos com oito canais, mas os mesmos podem ser conectados a outros módulos de modo a obter a quantidade de canais desejada.



Figura 2-23 - Exemplo de um equipamento de aquisição de dados.
Fonte: LMS (2013, pg. 2).

2.5 Carregamento vertical aplicado ao pavimento

Durante a pesquisa foram encontrados alguns estudos realizados sobre este tema. Porém, os mesmos se concentram em medições físicas de estradas Norte-Americanas (SWETT, MALLICK and HUMPHREY, 2008; TAPIA et al, 2008), Chinesas (YANG et al, 2009) e Canadense (BAYAT e KINGHT, 2012), análises computacionais de modelos simplificados (CHE, CHEN e MA, 2011; SUN, ZHANG e

ZHAO, 2011; WANG e YU, 2013; WU, LIANG e ADHIKARI, 2014), ou até mesmo estudos que não consideram a irregularidade longitudinal do pavimento em sua análise (WANG e AL-QADI, 2010).

A pesquisa que mais se aproximou do escopo desta Tese foi realizada por Szurgott, Kwasniewski e Wekezer (2009), onde os Autores instrumentaram a suspensão dianteira e traseira de um caminhão com transdutores de deslocamento e acelerômetro, porém a análise foi realizada apenas em um evento transiente (lombada). Além disso, os dados da suspensão como coeficiente de amortecimento, rigidez de buchas e das molas metálicas / pneumáticas tiveram que ser calculados com testes indiretos.

Após esta constatação se passou a acreditar na relevância e viabilidade do tema proposto, uma vez que este estudo poderia mensurar as cargas reais aplicadas ao pavimento Brasileiro. Adicionalmente, esta Tese iniciaria uma discussão acerca da influência das irregularidades longitudinais dos pavimentos na vida da suspensão dos veículos comerciais.

Esta revisão bibliográfica foi submetida ao *Journal of Traffic and Transportation Engineering* com o título “*A review about methodologies to estimate vertical load applied to the pavement*” (Anexo 1) e tinha como objetivo apresentar as diferentes formas utilizadas pelos pesquisadores para estimar as cargas verticais aplicados ao pavimento.

Vale ressaltar ainda que a pesquisa bibliográfica sobre o carregamento vertical aplicado ao pavimento teve como base os periódicos com maior fator de impacto na área de pavimentos definidos pela CAPES-QUALIS:

- *The International Journal of Pavement Engineering*;
- *Road Materials and Pavement Design* e,
- *International Journal of Pavement Research and Technology*.

3. METODOLOGIA

3.1 Considerações gerais

Após a pesquisa realizada na literatura existente, constatou-se que as simulações são as formas mais comuns para o levantamento do carregamento vertical aplicado ao pavimento. Todavia a simplificação, em alguns casos, dos modelos matemáticos demonstra ser um problema para a confiabilidade dos resultados.

Diante do exposto anteriormente, as cargas verticais aplicadas ao pavimento foram mensuradas através de um caminhão instrumentado, em rodovias / campo de provas, tendo em vista as seguintes vantagens:

- menor custo em relação ao pavimento instrumentado;
- possibilidade de definir o próprio “trilho-de-roda” – problema comum na aquisição de dados em pavimentos instrumentados;
- possibilidade de testar diferentes índices de irregularidade longitudinal e modos de condução dos motoristas e,
- considerar os parâmetros reais dos veículos: rigidez da mola, coeficiente de amortecimento, massa suspensa e massa não suspensa.

3.2 Classificação da pesquisa

Segundo os conceitos apresentados por Rey (1993), a pesquisa desenvolvida pode ser classificada como experimental, pois se trata de um método científico de observação de fatos, onde é possível comparar o efeito de duas condições, ou mais.

Esse mesmo Autor adiciona que as condições são denominadas de variáveis independentes, enquanto que as mudanças observadas em consequência são as variáveis dependentes.

Nos experimentos, o carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento foi a única variável dependente. Todas as outras foram consideradas variáveis independentes: IRI, velocidade do veículo, profundidade do buraco, aceleração longitudinal (frenagem) e aceleração lateral (curva e mudança de faixa).

Segundo Rey (1993), um fator determinante para o sucesso de pesquisas experimentais é evitar que a experimentação introduza variáveis desconhecidas (contaminação experimental). Para tanto, os experimentos foram conduzidos de modo a se analisar apenas uma variável independente de cada vez, mantendo as demais constantes.

Para a análise dos resultados foi utilizado o Método Indutivo, que segundo Marconi e Lakatos (2010) trata-se de um processo em que a partir de dados particulares, suficientemente constatados, é possível inferir uma verdade geral; tendo em vista as limitações do estudo apresentadas anteriormente.

3.3 Características do Veículo de Teste

Para a realização dos testes utilizou-se um caminhão com dois eixos dianteiros direcionais e dois eixos traseiros, sendo esses últimos um com e o outro sem tração. Além disso, o mesmo não possuía articulação para o acoplamento de

um reboque. Desta forma, para descrever tais características, esse veículo é denominado como “8x2 rígido”. Tal configuração foi escolhida devido à sua “popularidade” nas estradas Brasileiras, o que está diretamente ligada à possibilidade de aumento de carga no eixo dianteiro – originalmente 6 para 12 toneladas.



Figura 3-1 - Veículo 8x2 rígido utilizado durante as medições.

Outras características que devem ser destacadas em relação ao veículo utilizado:

- altura do centro de gravidade com carregamento legal: 1,1 m;
- altura do centro de gravidade sem carga: 0,9 m;
- dimensões do pneu: 275/80 R22,5;
- potência do motor: 330 cv;
- caminhão equipado com freios ABS e transmissão automatizada;
- carregamento do primeiro eixo dianteiro: 5.515 toneladas (5.515 kg);
- carregamento do segundo eixo dianteiro: 6.215 toneladas (6.215 kg) e,
- carregamento da suspensão traseira (duplo *tanden*): 17,5 toneladas (17.500 kg).

Foram escolhidos os eixos dianteiros para as análises, pois os mesmos possuem a maior carga vertical por ponto de apoio. Além disso, como pode ser

observado na Revisão Bibliográfica, todos os caminhões que trafegam nas estradas Brasileiras possuem o mesmo conceito de suspensão dianteira, baseado em molas metálicas. Essa afirmação não pode ser estendida para a suspensão traseira a qual possui uma grande variedade de conceitos: suspensão metálica / pneumática com diversas curvas de carga / deflexão, dependendo da aplicação na qual o veículo será utilizado.

As molas utilizadas possuíam rigidez constante aproximada de 210 N/mm - característica linear.

O amortecedor é um caso que merece atenção especial pois, como visto na revisão bibliográfica, é considerado, em alguns casos, como um fator constante. Porém, ao observar a Figura 3-2, é possível notar forças de amortecimento que variam de acordo com a velocidade de sua haste, tendo comportamento diferente para a tração (amortecedor abrindo) e compressão (amortecedor fechando), ou seja, este componente ao contrário da mola possui comportamento não-linear – O gráfico da Figura 3-2 também foi obtido através de ensaios preliminares às medições.

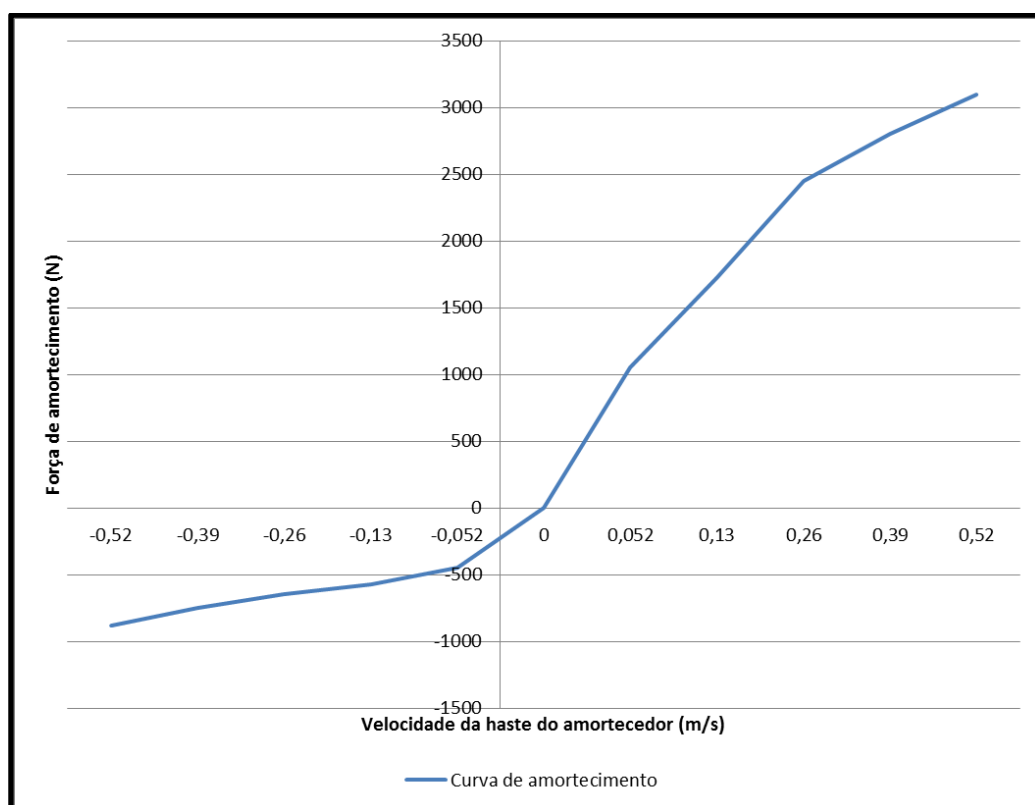


Figura 3-2 - Curva de amortecimento.

Por fim, é importante uma comparação entre os dados do veículo utilizado com alguns encontrados na literatura - Tabela 3-1 e Tabela 3-2.

Tabela 3-1 - Parâmetros do modelo de 1/4 de veículo - Comparação entre valores da literatura e o veículo de teste.

Parâmetro do veículo	Valores da literatura	Valores do veículo de teste
Massa não-suspensa	420 \pm 40 kg	590 kg
Massa suspensa	4535 \pm 500 kg	5,410 kg
Rigidez da mola	1,000,000 \pm 100,000 N/m	210,000 \pm 12,600 N/m
Forças de amortecimento	20,000 \pm 2,000 Ns/m	Tabela 3-2
Rigidez do pneu	1,950,000 \pm 200,000 N/m	889,041 N/m

Fonte: Adaptado de Cebon (1999); Belay et al (2007); Obrien e Enright (2011); Taheri, Obrien e Collop (2012).

Tabela 3-2 - Forças de amortecimento - Comparação entre valores da literatura e o veículo de teste.

Velocidade da haste do amortecedor	Valores da literatura	Valores do veículo de teste	
		Tração	Compressão
0.052 m/s	20,000 \pm 2,000 Ns/m	20,190 \pm 4,040 Ns/m	8,650 \pm 1,730 Ns/m
0.130 m/s		15,380 \pm 3,080 Ns/m	4,380 \pm 850 Ns/m
0.260 m/s		9,420 \pm 1,420 Ns/m	2,500 \pm 380 Ns/m
0.390 m/s		7,180 \pm 720 Ns/m	1,920 \pm 280 Ns/m
0.520 m/s		5,950 \pm 600 Ns/m	1,690 \pm 250 Ns/m

Fonte: Adaptado de Cebon (1999); Belay et al (2007); Taheri, Obrien e Collop (2012).

Como pode ser observado na Tabela 3-1 e Tabela 3-2, os valores do modelo de ¼ de veículo apresentados na literatura, em alguns casos, são distintos daqueles encontrados no veículo de teste, o que pode gerar resultados com pouco grau de confiabilidade em análises virtuais.

3.4 Instrumentação

A instrumentação, bem como o pós-processamento dos dados, utilizada para os experimentos foi aperfeiçoada ao longo de 4 anos e seu processo de desenvolvimento na obtenção dos resultados foram apresentados em Congressos Internacionais, conforme descrito abaixo:

KUBO, P.; PAIVA, C.. Vertical dynamic load impact on the pavement of an urban front engine bus. In: CETRA, 2., 2012, Croácia. **Anais**. Dubrovnik: International Conference on Road and Rail Infrastructure, 2012.

KUBO, P.; PAIVA, C.. Influence of tire pressure on the vertical dynamic load applied on the pavement by a truck's front suspension. In: CETRA, 3., 2014, Croácia. **Anais**. Split: International Conference on Road and Rail Infrastructure, 2014.

KUBO, P.; PAIVA, C.; FERREIRA, A.. Influence of shock absorber condition on the vertical dynamic load applied on the pavement by a truck's front suspension. In: ICTTE, 12., 2014, Itália. **Anais**. Veneza: International Conference on Traffic and Transportation Engineering, 2014.

KUBO, P.; PAIVA, C.; FERREIRA, A.; LAROCCA, A.; ROSE, B.. Influência da pressão do pneu em cargas dinâmicas verticais aplicadas ao pavimento pela suspensão dianteira de um caminhão. In: RAPV, 44., 2015, Brasil. **Anais**. Foz do Iguaçu: Reunião Anual de Pavimentação, 2015.

Conhecendo-se a dinâmica da suspensão dianteira do veículo foi possível instalar *strain gauges* em um arranjo de ponte-completa (Figura 3-3) nas quatro molas do 1^o e 2^o eixos direcionais.

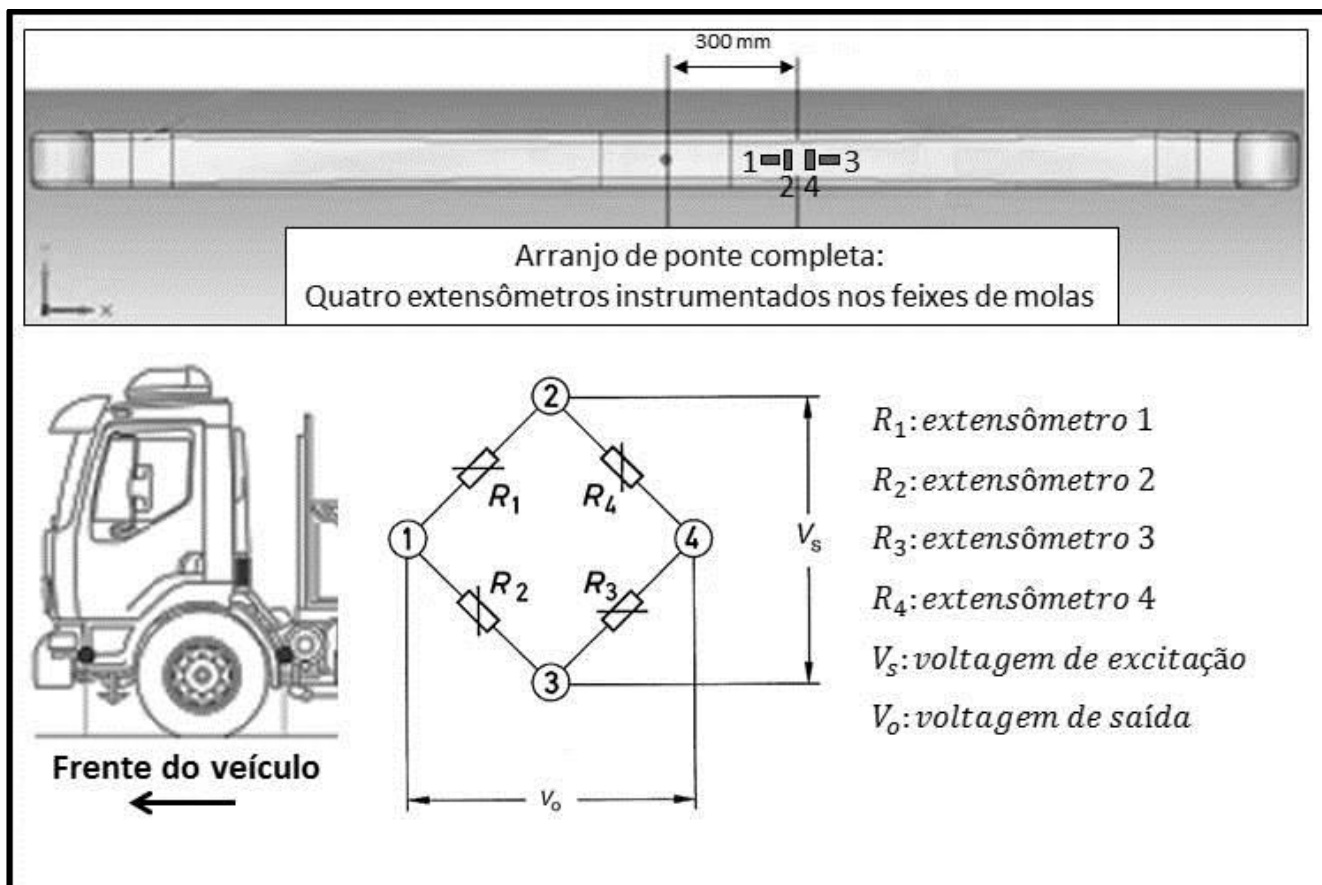


Figura 3-3 - Posição dos strain gauges.

Os dados gerados por esta instrumentação (Figura 3-3) são dados em $\mu\epsilon$ (*micro-strain*). Assim, foi necessário traçar uma curva de calibração para transformar esses valores em carga aplicada ao pavimento (toneladas).

Com a ajuda de pesos conhecidos, bem como balanças com precisão e resolução de ± 1 kg foi possível traçar as curvas de calibração da Figura 3-4 e Figura 3-5.

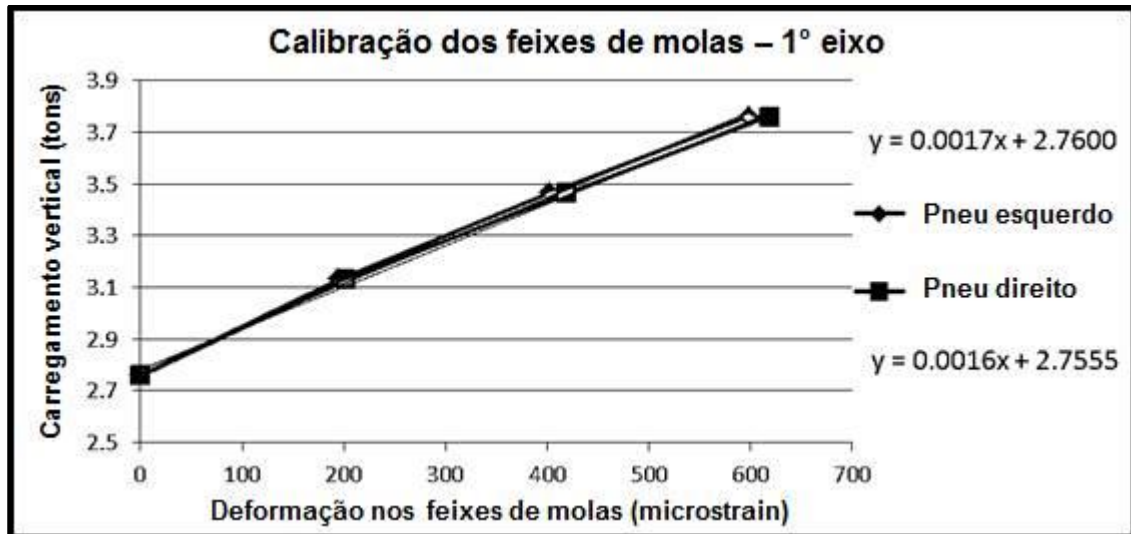


Figura 3-4 - Curva de calibração do primeiro eixo direcional

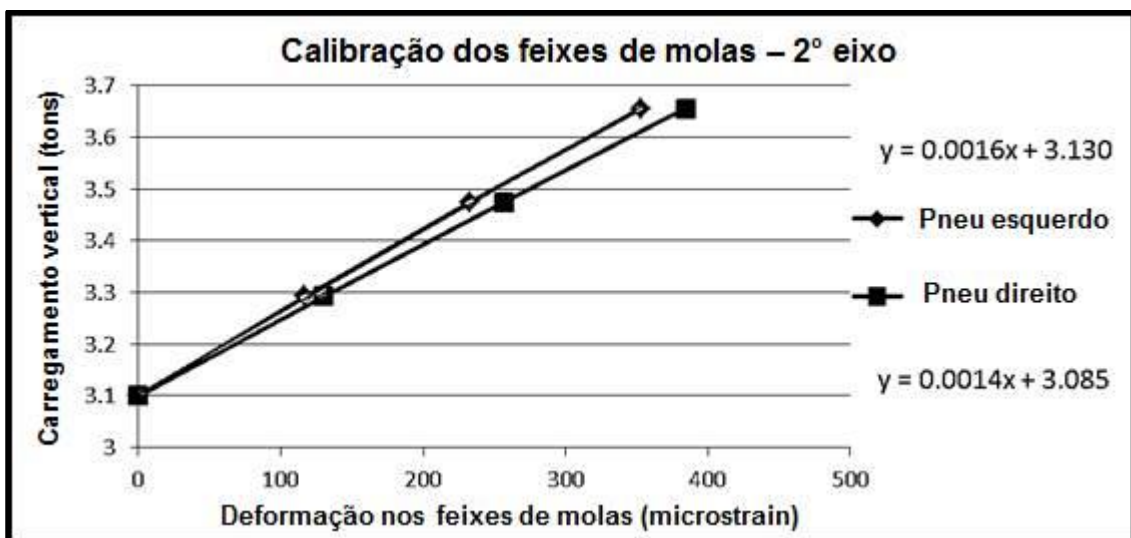


Figura 3-5 - Curva de calibração do segundo eixo direcional.

A Figura 3-6 ilustra os passos para a instrumentação completa, aquisição e pós-processamento dos dados.

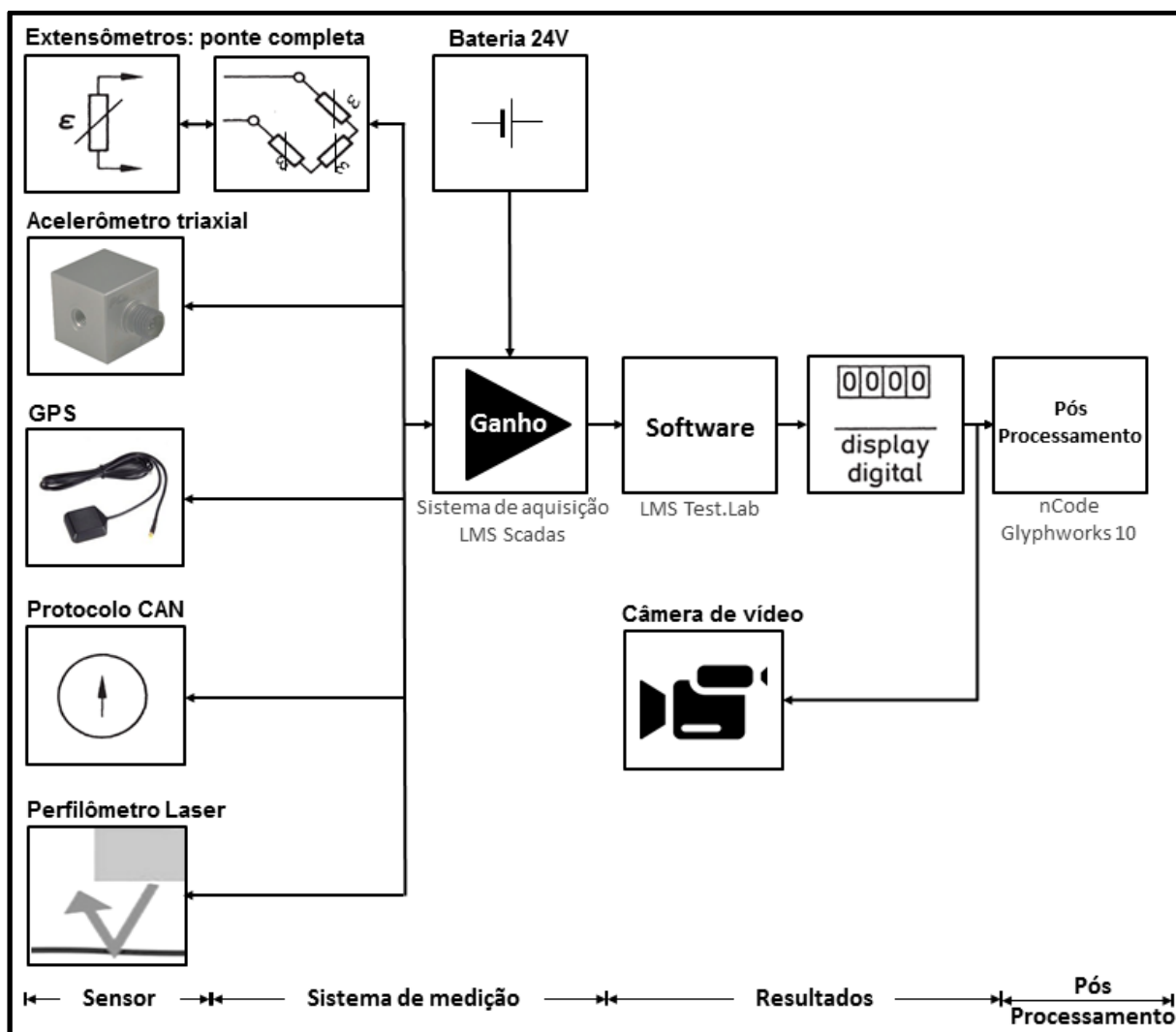


Figura 3-6 - Descrição da instrumentação, aquisição e pós-processamento dos dados – fotos ilustrativas dos sensores.

A definição dos sensores, apresentados na Figura 3-6, foi baseada na necessidade de medição de cada um dos eventos – Tabela 3-3. Porém, o sistema de aquisição e *software* de pós-tratamento dos dados foi o mesmo durante todos os ensaios.

Tabela 3-3 - Sumário dos sensores utilizados em cada um dos eventos.

Evento	<i>Strain gauge</i>	Acelerômetro	GPS	CAN	Perfilômetro	Vídeo
Curva horizontal	Sim	Lateral	Não	Velocidade	Não	Sim
Frenagem veicular	Sim	Longitudinal	Não	Velocidade e aplicação do pedal de freio	Não	Sim
Buraco no pavimento	Sim	Vertical	Não	Velocidade	Não	Sim
Índice de irregularidade longitudinal	Sim	Longitudinal, Lateral e Vertical	Sim	Velocidade e aplicação do pedal de freio	Sim	Sim

Vale ressaltar ainda as taxas de aquisição – quantidade de dados extraídos a cada segundo - de cada um dos equipamentos:

- *Strain gauges*: 512 Hz;
- Acelerômetro triaxial: 512 Hz;
- GPS: 4 Hz;
- Protocolo CANBus: 4Hz;
- Perfilômetro laser: 1024 Hz;

- Câmera de vídeo: 30 hz.

A instrumentação e metodologia das análises dos dados estão descritas no artigo "*Methodology to quantify the real vertical load applied to the pavement*" (Anexo 2) submetido ao *International Journal of Pavement Research and Technology* e demonstra a simplicidade da instrumentação adotada aliada ao processo não complexo de pós-tratamento dos resultados. Além disso, ressalta a confiabilidade em medições de baixa frequência da suspensão (mudança de faixa, curva, frenagem e lombadas), bem como eventos com alta frequência de acionamento da suspensão veicular (buracos e irregularidades longitudinais do pavimento).

3.5 Condições de Medição

3.5.1 Curva horizontal

Por uma questão de segurança e repetibilidade dos testes, as medições foram realizadas em um campo de provas localizado no sul do Brasil (Caxias do Sul). Tal pista possui raio de curvatura constante de 85,6 m e 3,7⁰ de superelevação.

A velocidade do primeiro experimento foi de 30 km/h com incremento de 10 km/h nos eventos subsequentes. Além disso, estipulou-se 70 km/h como velocidade máxima dos testes para manter o nível de segurança das pessoas envolvidas. Desta forma, foram aquisitados dados em: 30, 40, 50, 60 e 70 km/h (respectivamente: 8,3 / 11,1 / 13,9 / 16,7 / 19,4 m/s), com 3 repetições para cada medição.

Os valores de carregamento vertical foram comparados com os dados de aceleração lateral. Adicionalmente o protocolo CAN forneceu o sinal de velocidade do veículo.

3.5.2 Frenagem veicular

As medições de frenagem se basearam na norma mundial ECE R13 – *Economic Commission for Europe, European Homologation of Braking Systems* (ECE, 2012) que demanda, para este tipo de veículo, frenagens com velocidades iniciais de 20, 50 e 70 km/h (respectivamente: 5,6 / 13,9 / 19,4 m/s) com aplicação de 100% do pedal de freio. Porém, de modo a aumentar o universo de dados, outras porcentagens de aplicação de pedal de freio foram realizadas: 20, 40, 60, 80 e 100% - realizadas através de batente mecânico instalado no pedal de freio.

Desta forma, para cada velocidade inicial (20, 50 e 70 km/h), foram aplicados 5 cursos do pedal de freio (20, 40, 60, 80 e 100%). Cada medição foi repetida 3 vezes. Além disso, tomou-se o cuidado em realizar o experimento no mesmo dia para que o coeficiente de atrito da pista ($\mu = 0,8$) não influenciasse os resultados. Assim como nos testes de curva, utilizou-se um campo de provas localizado na região sul do Brasil, de modo a minimizar os riscos de acidentes.

Os valores de carregamento vertical foram comparados com os dados de aceleração (desaceleração) longitudinal do veículo. O protocolo CAN forneceu o sinal do exato momento da aplicação do pedal de freio, bem como a porcentagem da aplicação do mesmo.

3.5.3 Buraco no pavimento

Para as medições dos buracos também utilizou-se o mesmo campo de provas referentes aos testes de curva e frenagem. Porém, em uma pista dedicada para avaliações estruturais do veículo.

O buraco avaliado pode ser visto na Figura 3-7. Originalmente o mesmo possui dimensões individuais de 1300 mm x 760 mm x 80 mm, respectivamente comprimento, largura e profundidade.



Figura 3-7 - Buracos avaliados.

Vale ressaltar que os dois buracos permitem que ambos os pneus (lado esquerdo / lado direito) caiam ao mesmo tempo, o que permitiu a otimização dos testes.

Foram avaliadas 3 profundidades diferentes de buracos: 20, 40 e 80 mm. Para tanto, foi necessário confeccionar calços metálicos para adequar as novas dimensões – Figura 3-8.



Figura 3-8 - Buraco com calço metálico - Nova profundidade: 40 mm.

Para cada uma das profundidades dos buracos, considerou-se as velocidades de 20, 30, 40 e 50 km/h (respectivamente: 5,6 / 8,3 / 11,1 / 13,9 m/s) – cada medição foi repetida 3 vezes. Sendo que o comportamento do primeiro e segundo eixo direcionais foram analisados separadamente.

Os valores de carregamento vertical foram comparados com a aceleração vertical do eixo, bem como com a velocidade de veículo – parâmetro esse retirado do protocolo CAN.

3.5.4 Índice de irregularidade longitudinal (IRI)

Para as medições considerando o valor do IRI utilizou-se o perfilômetro laser da Empresa CiberMétrica, que foi desenvolvido a partir da Tese de Doutorado de Rodrigo Barella (BARELLA, 2008).

Em aplicações convencionais esse equipamento é instalado no pára-choque de automóveis / vans, mas para a melhor sincronização com os resultados

do carregamento do pavimento instalou-se o mesmo no caminhão de teste – Figura 3-9.



Figura 3-9 - Perfilômetro laser instalado no caminhão de testes.

As medições foram realizadas em rodovias arteriais, coletoras e de acesso localizadas nas cidades de Curitiba (PR) e Caxias do Sul (RS). No total, foram aquisitados 174 km de pavimento com variados estados de conservação. Para fins de cálculo, considerou-se trechos de 1 km de extensão.

- RS-122: Caxias do Sul: 40 km;
- BR-277: Curitiba – Campo Largo: 30 km;
- BR-476: Curitiba – Adrianópolis: 50 km;
- Rodovia da Ferraria – Passaúna: 20 km e,
- RS-453: Caxias do Sul: 34 km.

Ao contrário dos experimentos realizados no Campo de Provas (frenagem, curva e buraco), em um primeiro momento, não foi estipulada variável alguma de controle em relação à velocidade. Isso possibilitou que os dados fossem coletados em reais condições de uso do veículo. Porém, após as aquisições percebeu-se a necessidade de controlar esse parâmetro, bem como curvas e frenagens.

Além dos valores de carregamento vertical e IRI, foram coletados dados de aceleração (longitudinal, lateral e vertical), GPS, Protocolo CAN e vídeo, isto é, todos os sensores mencionados na Figura 3-6.

3.6 Análise Estatística e Pós-tratamento dos dados

3.6.1 ANOVA

Experimentos são uma parte natural dos processos de tomada de decisão em engenharia e ciências. Existem situações experimentais onde os resultados podem ser influenciados devido a presença de uma, ou mais, fontes de variações conhecidas e que podem ser controladas quando da realização do experimento (Montgomery e Runger, 2009).

No presente estudo, os influenciadores do carregamento vertical aplicado ao pavimento, nas condições de frenagem e na passagem por buracos, foram investigados por meio de uma Análise de Variância (ANOVA). Esta metodologia estatística é empregada para comparar médias, quando há mais de dois níveis de um único fator. Todas as análises neste estudo foram de um experimento fatorial com 2 fatores: Fator A com “a” tratamentos e Fator B com “b” tratamentos, conforme ilustrado na Tabela 3-4. Para esta análise, foi utilizado a distribuição “F” de Snedecor, com um nível de significância fixado em 5%.

Tabela 3-4 - ANOVA - Exemplo de tabela dos resultados.

FATOR A (a linhas)	FATOR B (b colunas)			
	C_1	C_2	...	C_b
L_1	X_{11}	X_{12}	$X_{1...}$	X_{1b}
L_2	X_{21}	X_{22}	$X_{2...}$	X_{2b}
...	$X_{...1}$	$X_{...2}$	$X_{.....}$	$X_{...b}$
L_a	X_{a1}	X_{a2}	$X_{a...}$	X_{ab}

Sachiko (2012) demonstra que sendo N o número total de elementos observados ($N = ab$), assim é possível definir as seguintes médias:

Média entre linhas:

$$\bar{X}_{i.} = \frac{\sum_{j=1}^b X_{ij}}{b} \quad (8)$$

Média entre colunas:

$$\bar{X}_{.j} = \frac{\sum_{i=1}^a X_{ij}}{a} \quad (9)$$

Média total:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b X_{ij}}{N} \quad (10)$$

Sendo o estudo das variações:

Variação total:

$$SQT = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a (x_{ij} - \bar{X})^2 \quad (11)$$

Variação devido ao 1º. Fator (entre linhas):

$$SQL = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a (\bar{X}_{i.} - \bar{X})^2 \quad (12)$$

Variação devido ao 2º. Fator (entre colunas):

$$SQC = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{X}_{.j} - \bar{X})^2 \quad (13)$$

Variação residual ou aleatória:

$$SQR = SQT - SQL - SQC \quad (14)$$

A partir de tais dados, é possível completar a Tabela 3-5 da análise de variância (ANOVA):

Tabela 3-5 - Tabela da análise de variância (ANOVA).

Fonte de Variação (FV)	Soma de Quadrado (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	Estatística F
Entre linhas	SQL	a-1	$S_L^2 = \frac{SQL}{a-1}$	$F_L = \frac{S_L^2}{S_R^2}$
Entre colunas	SQC	b-1	$S_C^2 = \frac{SQC}{b-1}$	$F_C = \frac{S_C^2}{S_R^2}$
Residual	SQR	(a-1)(b-1)	$S_R^2 = \frac{SQR}{(a-1)(b-1)}$	
Total	SQT	ab-1		

Para o referido estudo, buscou-se saber se existia diferença significativa entre os diferentes tratamentos, ou seja, se havia diferença significativa entre linhas / colunas.

Caso $F_L > F_{(a-1);(a-1)(b-1);\alpha}$, existe diferença significativa entre as linhas e quando $F_C > F_{(b-1);(a-1)(b-1);\alpha}$, há diferença significativa entre as colunas.

3.6.2 Teste de Tukey (HSD)

Quando uma análise de variância (ANOVA) aponta uma diferença significativa, isso indica que pelo menos um grupo é diferente dos outros grupos. No entanto, o teste não localiza onde especificamente é observado este contraste, em outras palavras, não se sabe quais as linhas ou colunas que diferem entre si. A fim de analisar o padrão de diferença entre as médias, a Análise de Variâncias é usualmente seguida por testes de comparações múltiplas entre pares (Abdi e Williams, 2010).

Neste trabalho, optou-se pelo teste de diferença significativa honesta (HSD, do inglês “Honestly Significant Difference”) de Tukey, por ser uma técnica de comparação fácil e frequentemente utilizada (Abdi e Williams, 2010), com o mesmo nível de significância estabelecido na ANOVA (5%).

O teste de Tukey permite testar qualquer contraste, entre duas médias de tratamentos, baseando-se na Diferença Mínima Significativa (DMS) e na distribuição de student (q). A estatística do teste, utilizada na metodologia dos experimentos do presente trabalho, é dada da seguinte forma:

Existe diferença significativa entre duas linhas, caso:

$$\bar{X}_L - \bar{X}_m > q_{a;(a-1)(b-1);\alpha} \sqrt{\frac{S_R^2}{b}} \quad (15)$$

Existe diferença significativa entre colunas, caso:

$$\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{.m} > q_{b;(a-1)(b-1); \alpha} \sqrt{\frac{S_R^2}{a}} \quad (16)$$

3.6.3 Cálculo de Dano Relativo

Para a análise da influência das irregularidades longitudinais do pavimento na durabilidade da suspensão dianteira de um caminhão utilizou-se o conceito de Dano Relativo.

Em termos gerais, Dowling (2012) enfatiza que se um objeto de teste for submetido à uma tensão cíclica, suficientemente severa, uma trinca oriunda de fadiga nucleará, podendo se estender até a completa falha do componente. Além disso, esse Autor adiciona que o nível de carregamento aplicado é inversamente proporcional ao número de ciclos até a falha.

Os valores dos diferentes níveis de carregamento podem ser descritos em um gráfico denominado de curva S-N, ou curva de Wöhler - Figura 3-10.

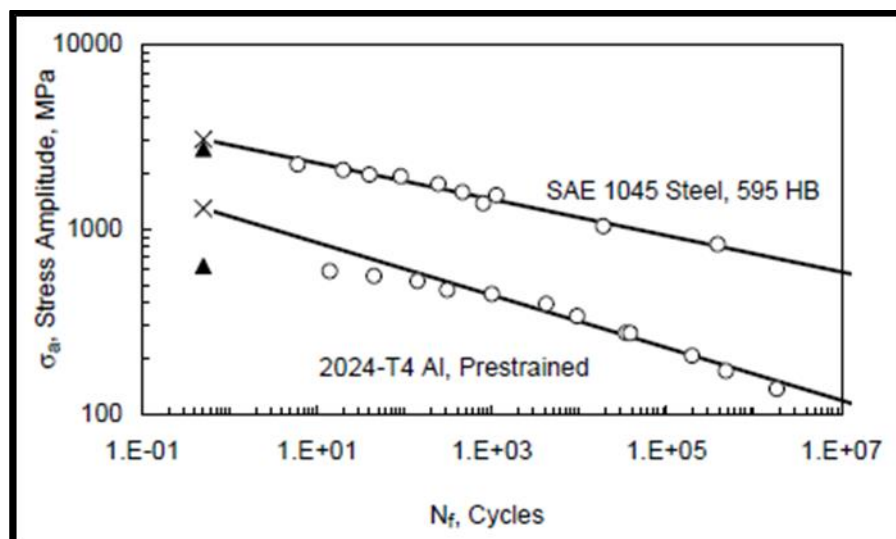


Figura 3-10 - Exemplo de curva S-N de dois materiais distintos.
Fonte: Dowling (2012).

O número de ciclos até a falha é alterado rapidamente com o nível de tensão. Desta forma, ambas escalas (tensão e número de ciclos) são dispostas em escala logarítmica para melhor visualização.

A curva de Wöhler é levantada através de ensaios em corpos de prova, os quais são testados até a falha quando submetidos a um sinal senoidal com amplitude e frequência constantes (Figura 3-11).

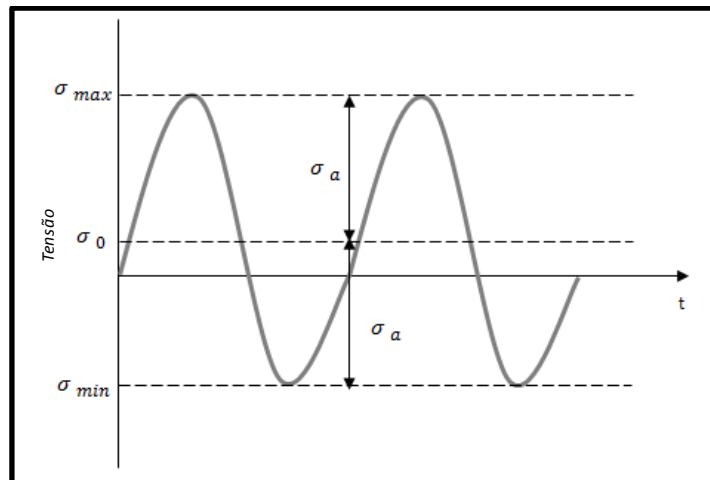


Figura 3-11 - Figura esquemática de um sinal senoidal para obtenção da curva S-N.
Fonte: Dowling (2012).

Através da curva S-N, obtem-se diretamente o número de ciclos até a falha, para um sinal com amplitude constante. Infelizmente são poucas as aplicações que possuem este comportamento.

Diante desse contexto, A. Palmgren sugeriu a seguinte equação (DOWLING, 2012):

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = \sum \frac{N_j}{N_{fj}} = 1 \quad (18)$$

Onde:

N_j : número de ciclos para um dada amplitude de carregamento e,

N_{fj} : número de ciclos até a falha proveniente de uma curva S-N, para um dado carregamento.

De um modo geral, Palmgren afirma que um componente falhará, quando a soma das razões entre o número de ciclos, para cada carregamento, e o número de ciclos provenientes da curva S-N for igual à 1 (Figura 3-12).

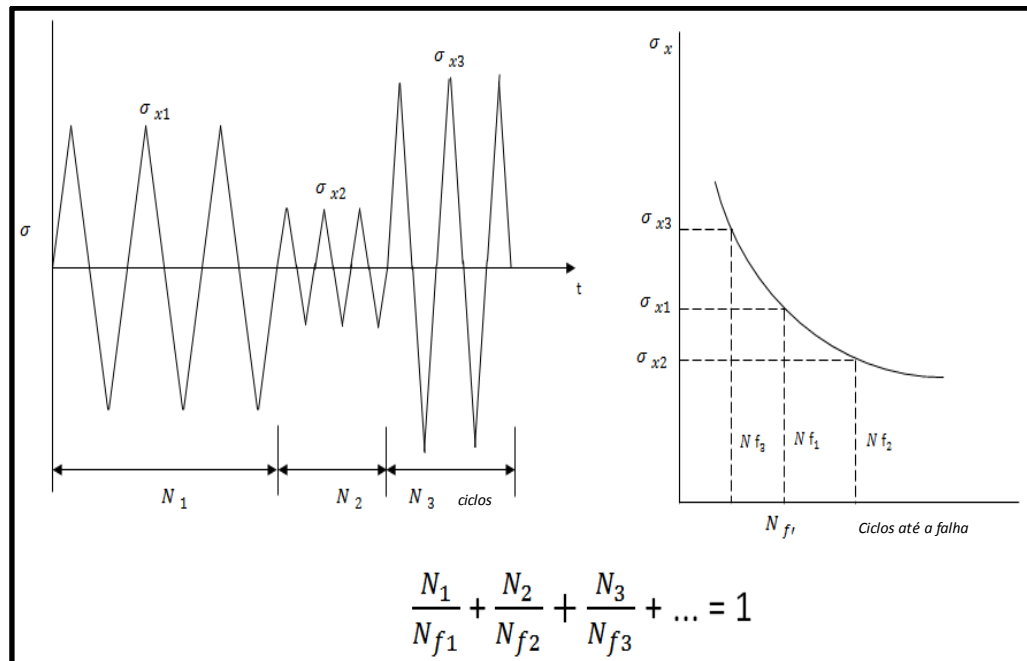


Figura 3-12 - Representação da regra de Palmgren-Miner.

Fonte: Dowling (2012).

Esse Autor criou este conceito em 1920, para calcular a vida das esferas de um rolamento, porém somente em 1945 essa idéia foi difundida através de uma publicação feita por M. A. Miner (MINER, 1945), ficando assim mundialmente conhecida como Regra de Palmgren-Miner.

Por outra lado, Dowling (2012) alerta que, para carregamentos com elevado nível de variações, como o ilustrado na Figura 3-13, não é trivial o entendimento de como os eventos individuais devem ser isolados para que seja aplicado tal conceito.

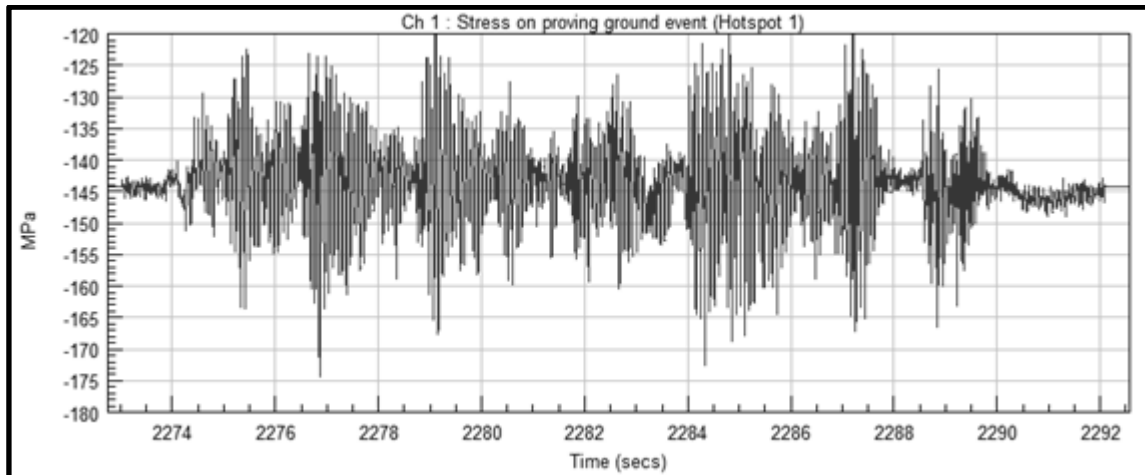


Figura 3-13 - Exemplo de sinal com elevado nível de variação.

Desta forma, Endo e Matsushi (1968) propuseram um procedimento denominado rainflow cycle counting. Tal método estabelece a contagem de um ciclo no caso em que seja obedecido o critério apresentado na Figura 3-14.

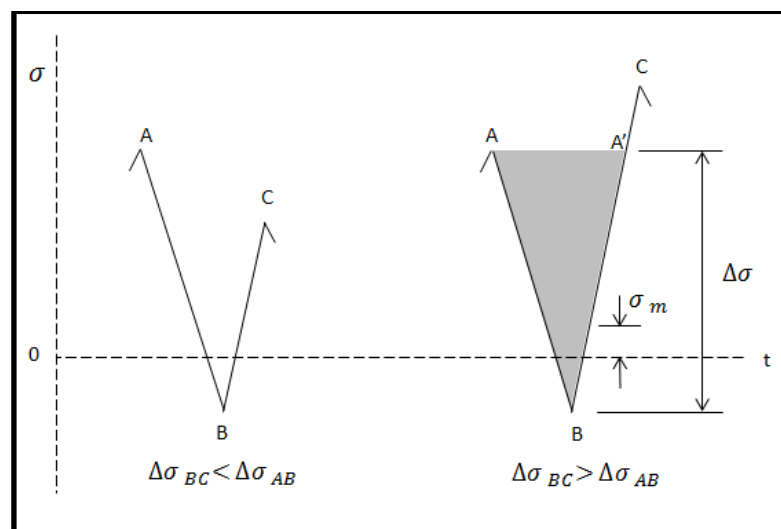


Figura 3-14 - Princípio básico da contagem de ciclo do tipo rainflow.
Fonte: Dowling (2012).

Tendo a combinação de pico-vale-pico “A-B-C” - Figura 3-14 – será considerado um ciclo caso uma variação de amplitude, $\Delta\sigma_{bc}$, seja maior, ou igual, à variação de amplitude que o antecede.

Finalmente, utilizando os conceitos de Palmgren-Miner / Endo e Matsushi / Curva S-N é possível definir as equações referentes ao cálculo de dano absoluto, utilizando a contagem de ciclos do tipo rainflow (DOWNLING, 2012):

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \quad (19)$$

Onde:

σ_a : media da amplitude de cada ciclo de rainflow (σ_{\max} e σ_{\min});

σ_{\max} : máxima amplitude (pico) de cada ciclo de rainflow e,

σ_{\min} : mínima amplitude (vale) de cada ciclo de rainflow.

$$N_{fj} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_{\max} \cdot \sigma_a}}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (20)$$

Onde:

N_{fj} : quantidade de ciclos até a falha proveniente da curva S-N;

σ'_f : carregamento teórico que indica a falha com zero ciclos (propriedade do material) e,

b : inclinação da curva S-N (propriedade do material).

$$\text{dano absoluto} = \sum \frac{N_i}{N_{fj}} \quad (21)$$

Vale ressaltar que as equações (18) e (21) tratam-se da mesma fórmula (Palmgren-Miner), porém a última considera o levantamento de ciclos do tipo rainflow.

Adicionalmente, é possível estabelecer a severidade entre duas condições diferentes dividindo os seus respectivos valores de dano absoluto, o que define o conceito dano relativo utilizado no presente trabalho:

$$\text{dano relativo} = \frac{\text{dano absoluto}_1}{\text{dano absoluto}_2} \quad (22)$$

4. RESULTADOS

4.1 Curva horizontal

Como mencionado no Capítulo sobre Metodologia, por uma questão de segurança, a velocidade máxima estipulada para este experimento foi de 70 km/h (19,4 m/s), o que resultou em uma aceleração lateral de 0.34 g (3,3 m/s²), porém algumas análises virtuais (LIMA, GARBIN e SANTOS NETO, 2008) sugerem acelerações laterais de até 0.7 g (6,9 m/s²) para atingir a iminência ao tombamento.

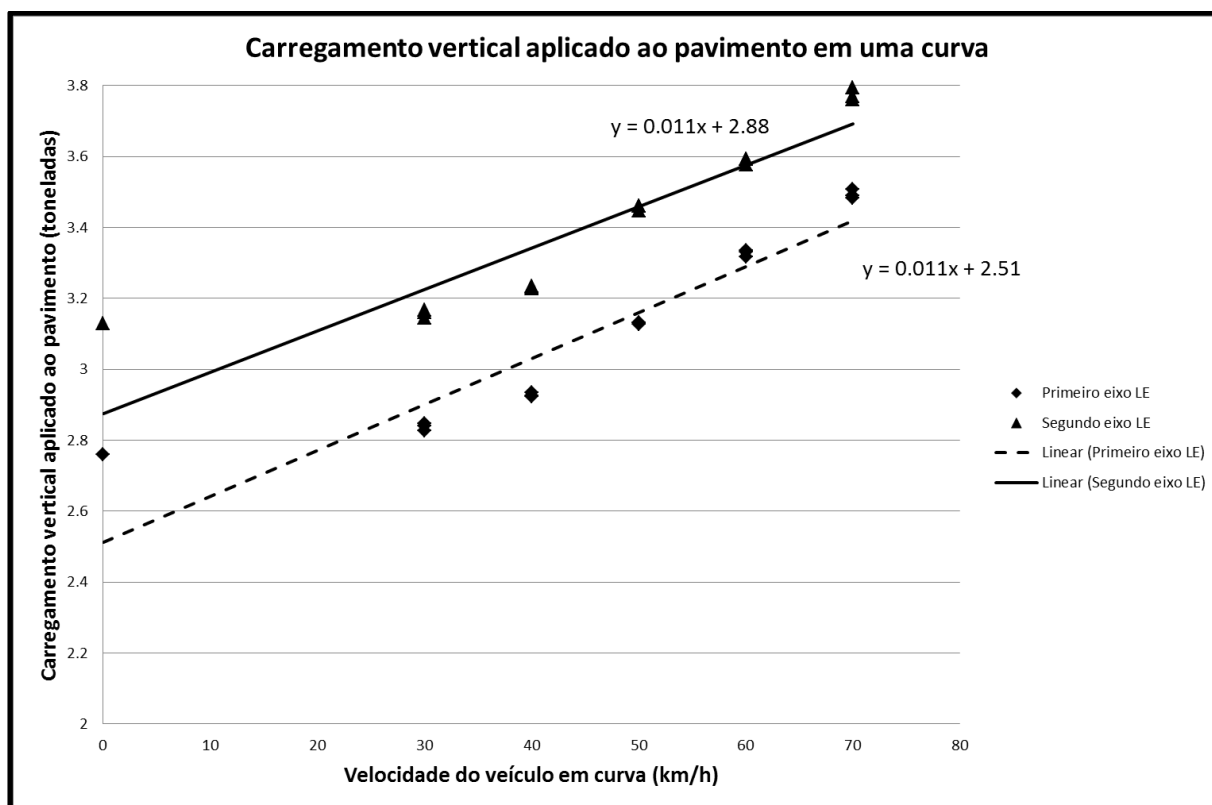


Figura 4-1 - Gráfico do carregamento vertical aplicado ao pavimento (toneladas) vs Velocidade do veículo em curva (km/h).

A partir da Figura 4-1 é possível notar que a inclinação da reta é a mesma em ambos os eixos analisados ($y = 0,011x$), sendo o carregamento estático a única diferença – 2,88 toneladas (2.880 kg) no primeiro eixo lado esquerdo e 2,51 toneladas (2.510 kg) no segundo eixo lado esquerdo.

De um modo geral, para uma curva de 85,6 m de raio e 3,7° de superelevação é possível utilizar a Equação 33:

$$L_v = 0,011 \times V + L_s \quad (23)$$

Onde:

L_v : carregamento vertical aplicado ao pavimento (toneladas);

V : velocidade do veículo (km/h) e,

L_s : carregamento estático do veículo.

Tais resultados geraram o artigo *“Quantification of the vertical load applied to the pavement during cornering maneuver of a commercial vehicle”* (Anexo 3) submetido ao *International Journal of Pavements*.

4.2 Frenagem veicular

O comportamento das cargas aplicado ao pavimento, durante uma frenagem veicular, não foi encontrada nos periódicos mencionados no capítulo sobre Revisão Bibliográfica. Desta forma, inicia-se a análise dos resultados deste evento apresentando passo-a-passo a distribuição das cargas durante uma frenagem com 100% do pedal de freio, e velocidade inicial de 70 km/h (19,4 m/s) - Figura 4-2. Porém, vale ressaltar que, apesar dos diferentes parâmetros utilizados, o veículo apresentou comportamento semelhante em todas as manobras de frenagem.

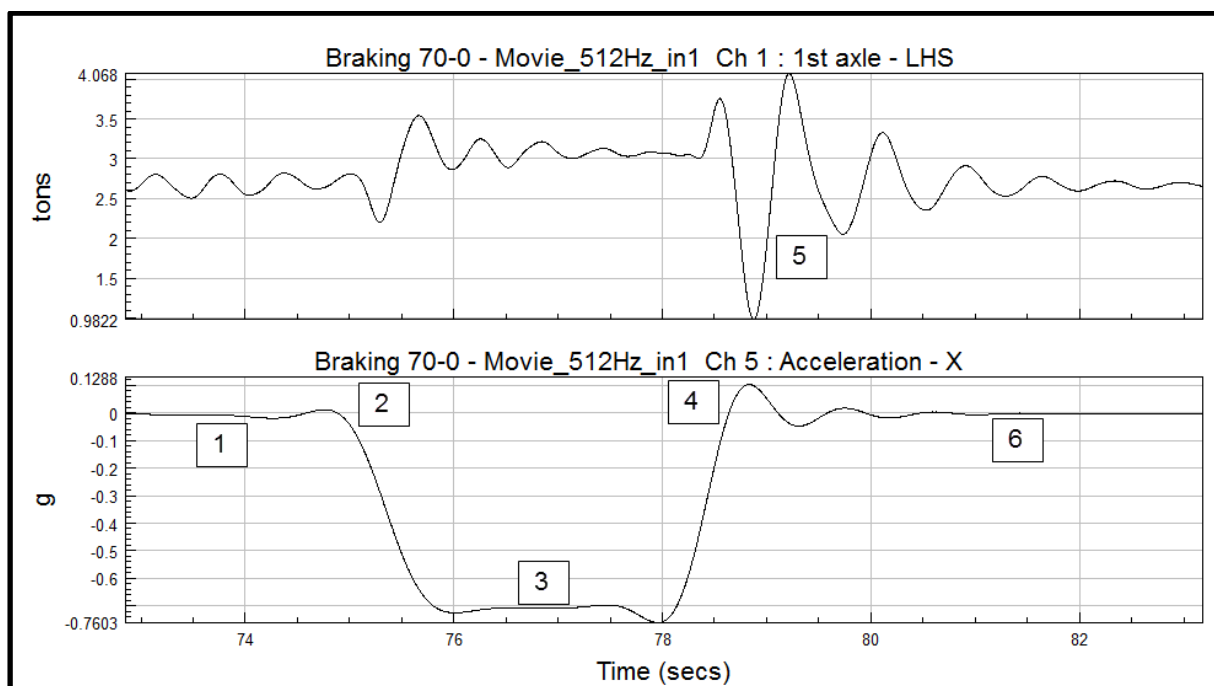


Figura 4-2 - Carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento durante frenagem.

Onde:

- 1: velocidade inicial constante (70 km/h ou 19,4 m/s);
- 2: aplicado o pedal de freio (100%);
- 3: desaceleração constante no sentido longitudinal (eixo X);
- 4: velocidade final do veículo igual à 0 km/h;
- 5: movimento de parada do veículo, devido à oscilação da suspensão e,
- 6: veículo na condição de repouso.

Analisando a Figura 4-2 é possível notar que o carregamento máximo aplicado ao pavimento se dá durante a parada completa do veículo e não durante a desaceleração constante do mesmo.

Desta forma, é apresentada a Figura 4-3, onde todos os valores de pico de transferência de carga foram agrupados. Adicionalmente é apresentado a diferença média e teste de Tukey, considerando a diferença média significativa de 0,32 – Tabela 4-1.

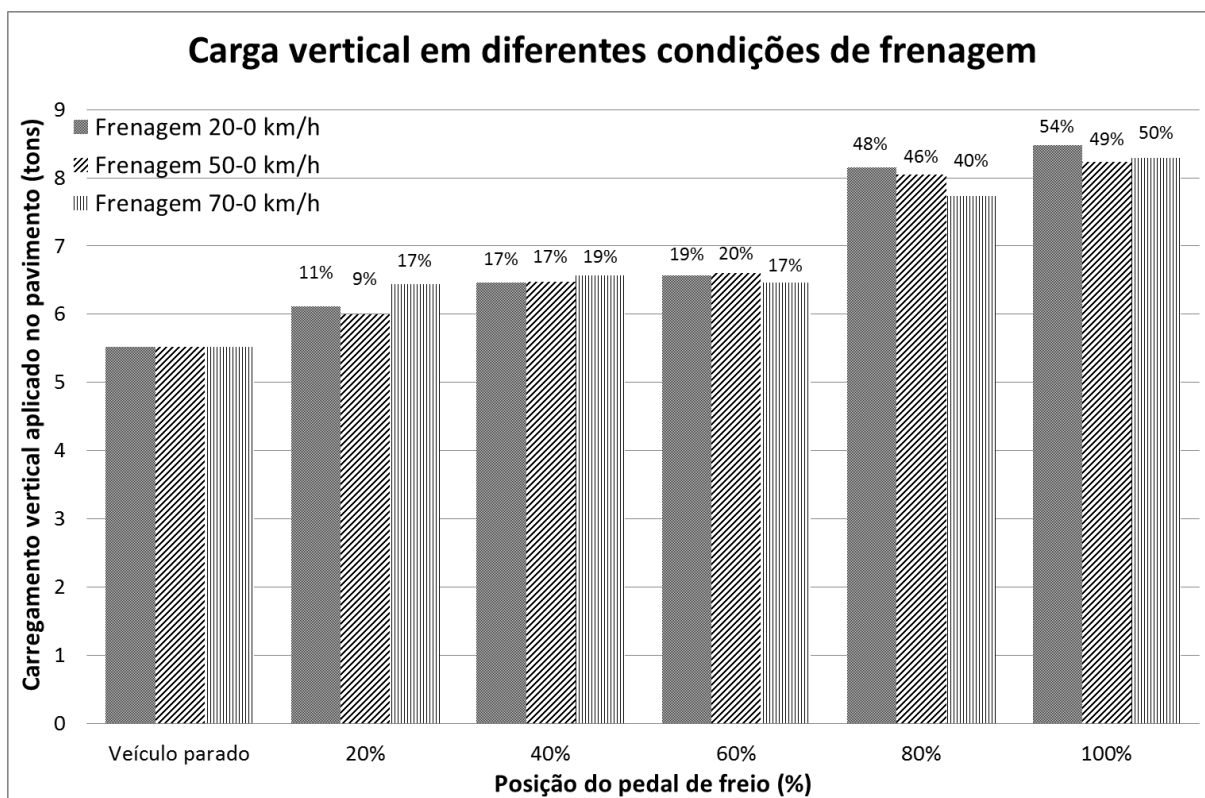


Figura 4-3 - Valores de pico de carregamento durante os testes de frenagem.

Tabela 4-1 - Teste de Tukey - Frenagem.

Diferença média e teste de Tukey (Diferença média significativa = 0.32)					
Posição do pedal de freio (%)	20	40	60	80	100
20	*	DNS (0.27)	DS (0.34)	DS (1.92)	DS (2.28)
40	*	*	DNS (0.02)	DS (1.62)	DS (1.99)
60	*	*	*	DS (1.58)	DS (1.94)
80	*	*	*	*	DS (0.46)
100	*	*	*	*	*

Onde:

DNS: diferença não significativa (diferença média < 0,32) e,

DS: diferença significativa (diferença média > 0,32).

De um modo geral, a Figura 4-3 (Valores de pico) e a Tabela 4-1 (Teste de Tukey) indicam que a diferença é significativa quando se compara uma posição do pedal igual ou maior do que 60%. Em outras palavras, não existe diferença significativa quando se compara resultados com pequena porcentagem de aplicação do pedal de freio.

Os resultados da frenagem veicular geraram o artigo “*Quantification of the vertical load applied to the pavement during braking maneuver of a commercial vehicle*” (Anexo 4) aprovado no *Journal of Transportation Engineering*.

4.3 Buraco no pavimento

Os eventos de buraco, assim como a frenagem, também possuem comportamentos semelhantes independentemente da velocidade do veículo, bem como a profundidade do obstáculo – Figura 4-4.

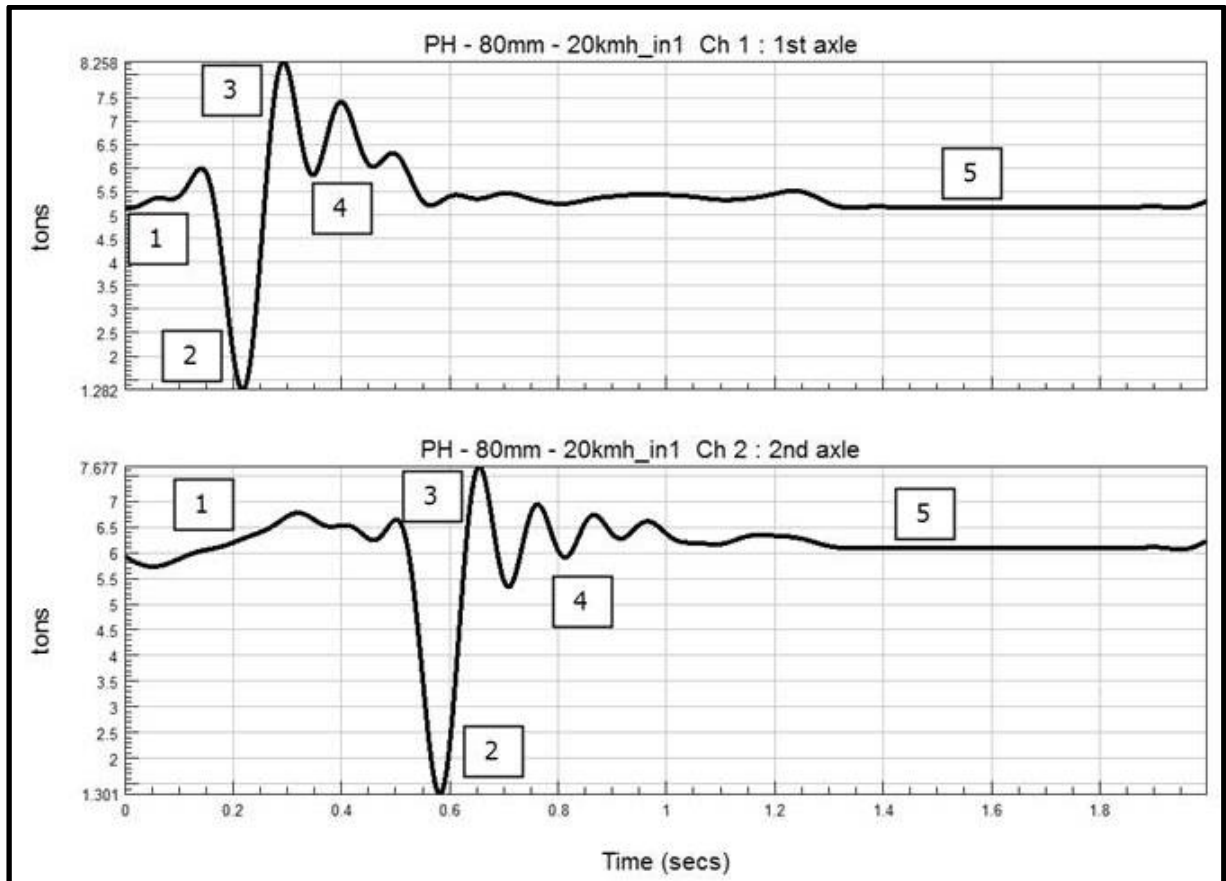


Figura 4-4 - Carregamento vertical dinâmico aplicado ao pavimento durante a passagem em um buraco.

Onde:

- 1: velocidade constante (20 km/h ou 5,6 m/s);
- 2: conjunto roda / pneu caindo no buraco, mas não perdendo o contato com o pavimento;
- 3: conjunto roda / pneu tocando o fundo / borda do buraco – suspensão comprimida;
- 4: oscilação da suspensão e,
- 5: veículo em condição de repouso.

Na Figura 4-4 são apresentados os comportamentos de transferência de carga do primeiro eixo direcional (gráfico superior) e do segundo eixo direcional (gráfico inferior). Porém, apesar de estarem fora de fase, devido ao fato de que foi

analisado o mesmo buraco para ambos os eixos, é possível notar a semelhança entre as curvas.

O primeiro ponto que faz-se necessário salientar é o denominado “2”, que descreve a queda do conjunto roda/pneu no buraco. É possível notar que, apesar de baixo, o valor do carregamento não é nulo – isto indica que o amortecedor realizou a sua função de não permitir a perda de contato entre o pneu / pavimento. Inversamente também é apresentado o ponto “3” onde ocorre a compressão máxima da suspensão do veículo, quando há o contato entre o conjunto roda/pneu com o fundo/borda do buraco.

A Figura 4-5 mostra os valores de pico de carregamento do segundo eixo direcional. Adicionalmente é apresentado a diferença média e teste de Tukey, considerando a diferença média significativa de 1,02 para velocidade do veículo e 0,79 para a profundidade do buraco – Tabela 4-2 e Tabela 4-3.

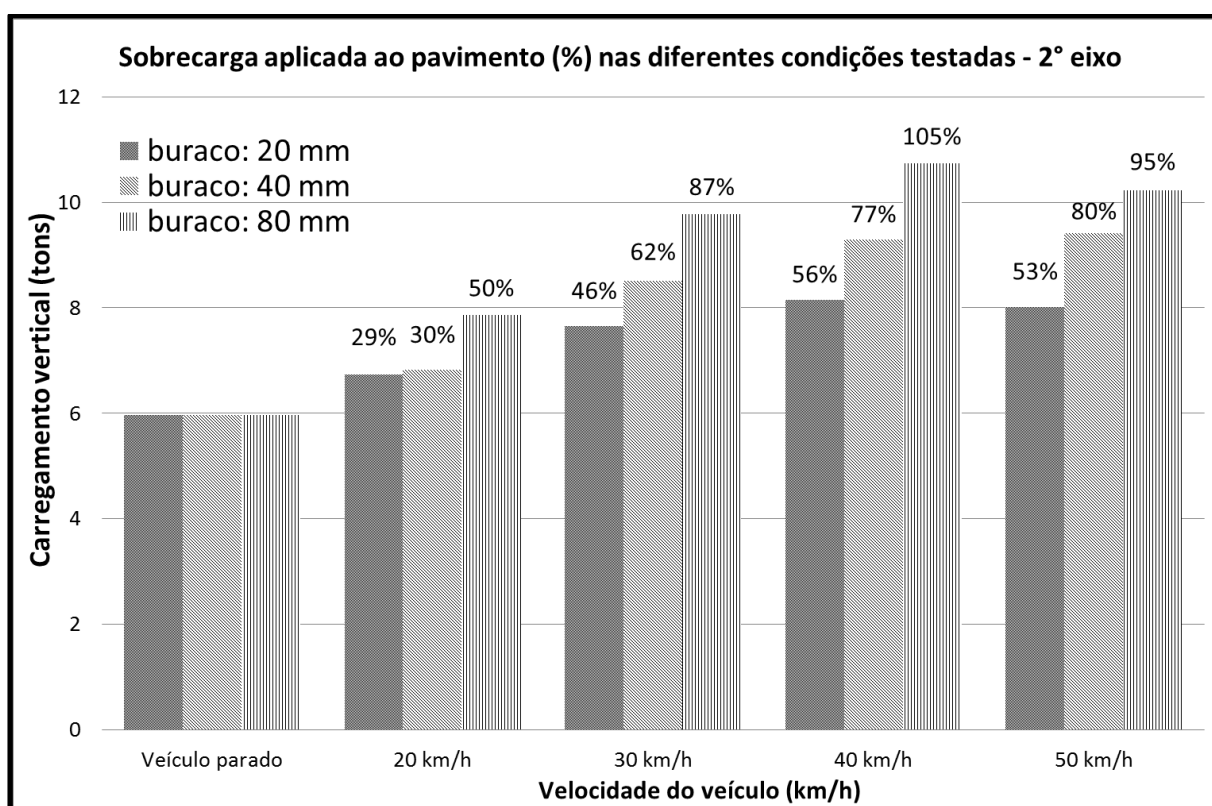


Figura 4-5 - Valores de pico durante a passagem nos buracos - Segundo eixo direcional.

Tabela 4-2 - Teste de Tukey - Buraco - Velocidade do veículo.

Diferença média e teste de Tukey (Diferença média significativa = 1.02)				
Velocidade (km/h)	20	30	40	50
20	*	DS (1.50)	DS (2.25)	DS (2.08)
30	*	*	DNS (0.75)	DNS (0.57)
40	*	*	*	DNS (0.17)

Onde:

DNS: diferença não significativa (diferença média < 1,02) e,

DS: diferença significativa (diferença média > 1,02).

Tabela 4-3 - Teste de Tukey - Buraco – Profundidade do buraco.

Diferença média e teste de Tukey (Diferença média significativa = 0.79)			
Profundidade do buraco (mm)	20	40	80
20	*	DS (0.87)	DS (2.00)
40	*	*	DS (1.14)

Onde:

DNS: diferença não significativa (diferença média < 0,79) e,

DS: diferença significativa (diferença média > 0,79).

O Teste de Tukey apresenta diferença significativa tanto pela variação da velocidade do veículo, quanto pela profundidade do buraco. Apesar de neste item só terem sido apresentados os resultados do segundo eixo, tais afirmações também são válidas para o primeiro eixo do veículo.

Adicionalmente, vale enfatizar que a profundidade dos buracos têm influência direta no carregamento vertical aplicado ao pavimento, enquanto que a velocidade do veículo tem uma diferença mais significativa em velocidades abaixo de 40 km/h (11,1 m/s).

Os resultados acima descritos geraram o artigo “*Assessment of the vertical load applied to the pavement on pothole events*” (Anexo 5) submetido ao *International Journal of Pavement Engineering*.

4.4 Índice de irregularidade longitudinal (IRI)

O resultado do dano relativo causado na suspensão primária dianteira do veículo de teste, pela variação de irregularidades longitudinais do pavimento, é apresentado na Figura 4-6 – o valor de referência (100%) considerado, equivale ao menor dano relativo encontrado. Apesar da aparente dispersão dos resultados, fica evidente o agrupamento entre os valores de dano relativo com os dados de IRI:

- Verde: $1 < \text{IRI} < 2$;
- Amarelo: $2 < \text{IRI} < 4,5$ e,
- Vermelho: $\text{IRI} > 4,5$.

As faixas de IRI mencionadas anteriormente, se assemelham às propostas por Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) e Bernucci et al (2010) - Figura 4-6.

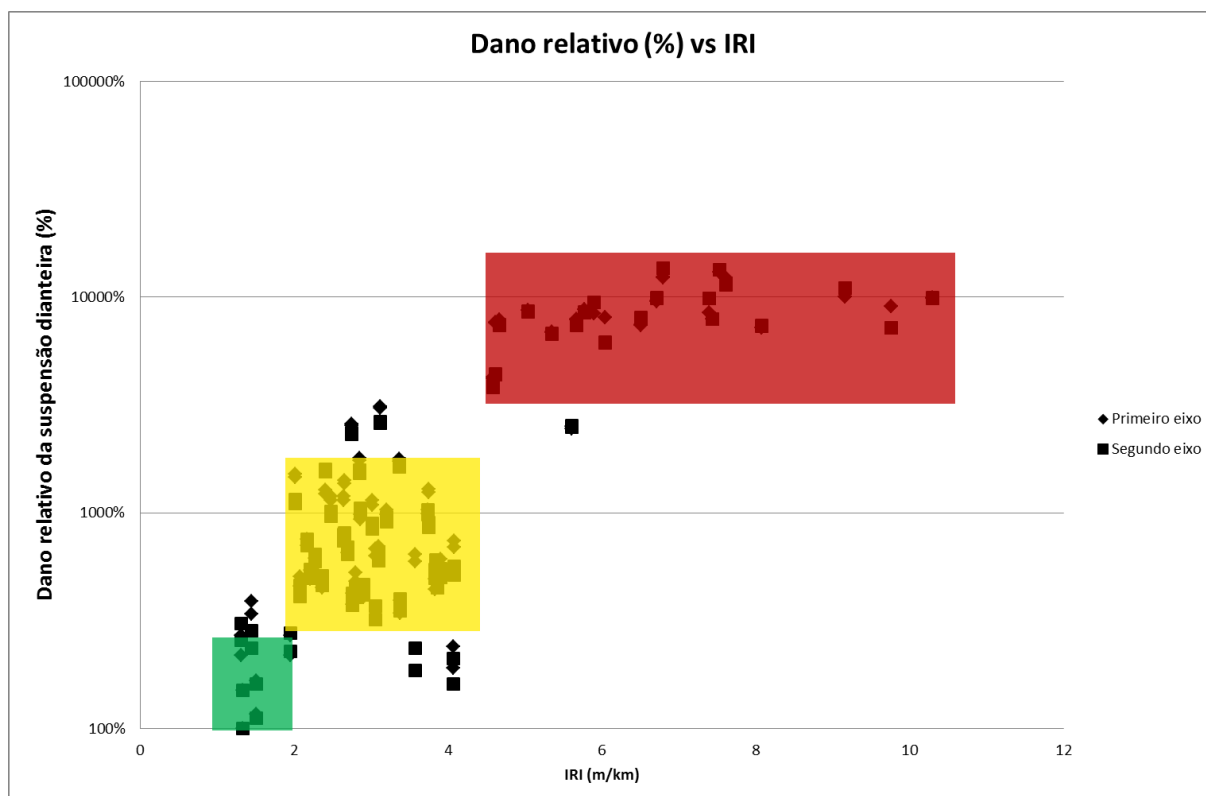


Figura 4-6 - Comparação entre Dano relativo e IRI - 174 km de medições.

Para minimizar os fatores de dispersão, foram escolhidos dentre os 174 km, os trechos com as seguintes características:

- velocidade mínima de 50 km/h (13,9 m/s): valor esse baseado nos resultados dos testes com buracos, onde fica evidente a menor variabilidade dos resultados a partir desta velocidade;
- trechos onde não foram aplicados o freio de serviço: faz referência aos resultados das medições durante a frenagem, onde se observam picos de carregamento vertical aplicado ao pavimento e,
- trechos retos: sem a influência das curvas, devido ao mecanismo de rolagem / transferência de carga do veículo.

Através das medições controladas foi possível traçar um modelo que caracteriza as diferentes faixas de IRI pelo dano relativo causado à suspensão primária dianteira do veículo – Figura 4-7.

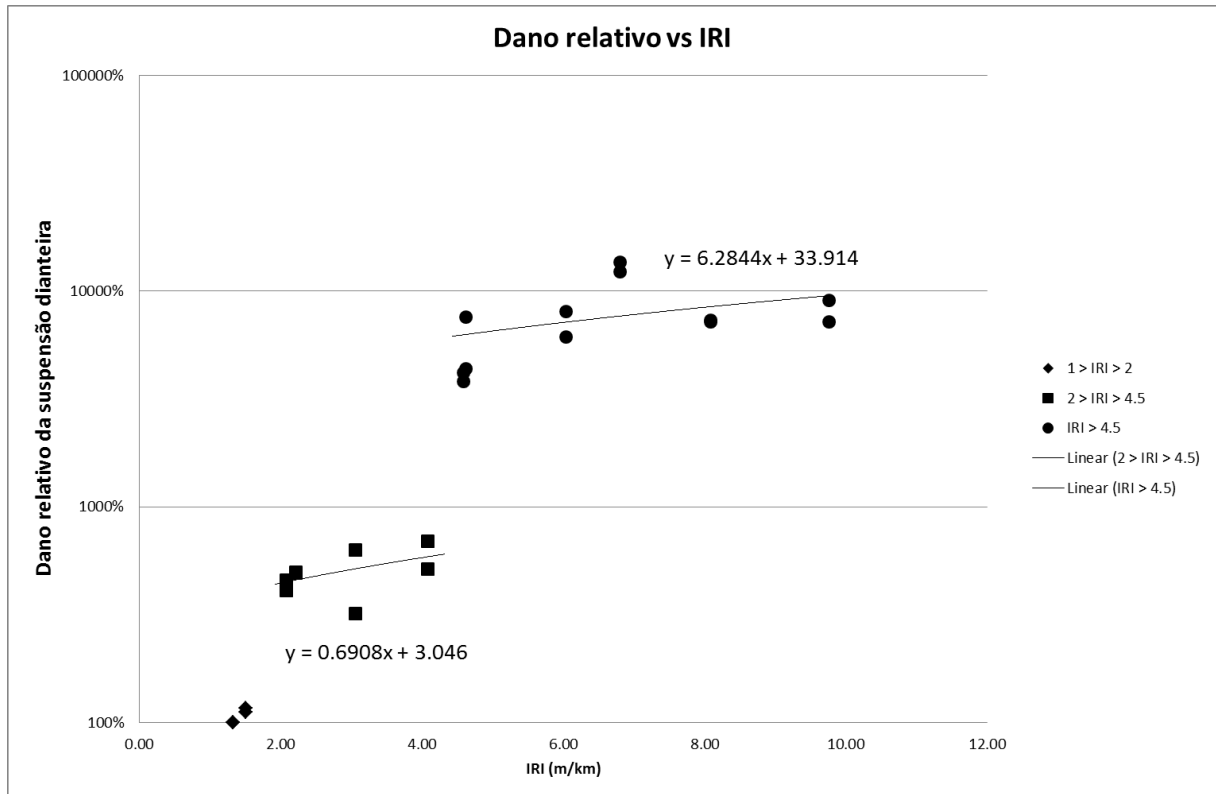


Figura 4-7 - Comparação entre Dano relativo e IRI - Trechos controlados.

Com o auxílio dos dados relativos às medições no campo de provas, foi possível adicionar os eventos de frenagem (100% do pedal de freio aplicado) e curva (70 km/h ou 19,4 m/s) no sinal dos trechos controlados de modo a verificar a influência dos mesmos no resultado geral do dano relativo. A Figura 4-8 apresenta um exemplo da frenagem com 100% de pedal de freio acoplado, em um trecho com IRI de 2,08 m/km.

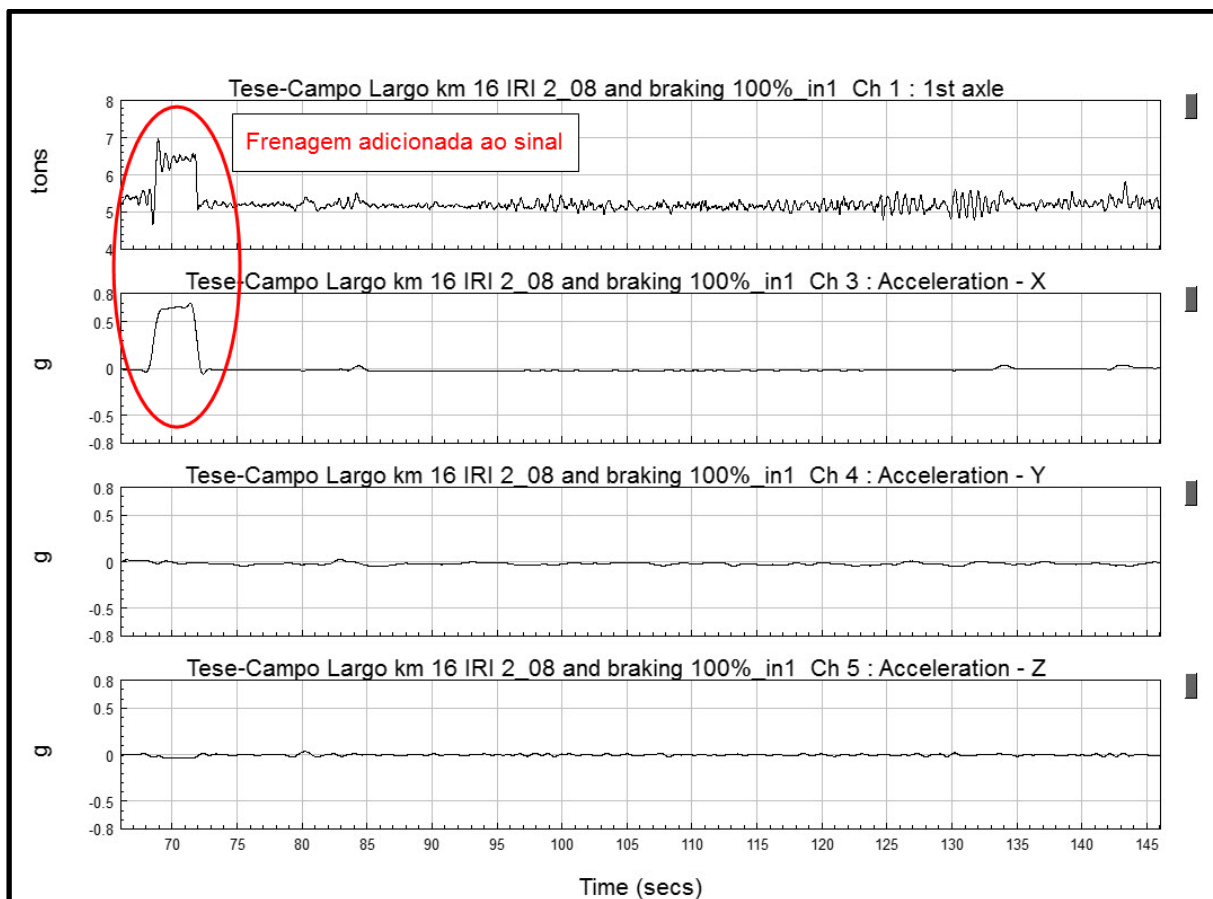


Figura 4-8 - Exemplo da adição de frenagem (100%) em um trecho com IRI de 2,08 m/km.

Procedimento semelhante foi adotado para os eventos de curva, mas os valores de dano relativo tiveram pouca alteração em relação ao valor original, uma vez que os valores deste evento são inferiores àqueles encontrados durante as medições nos trechos controlados - Figura 4-9.

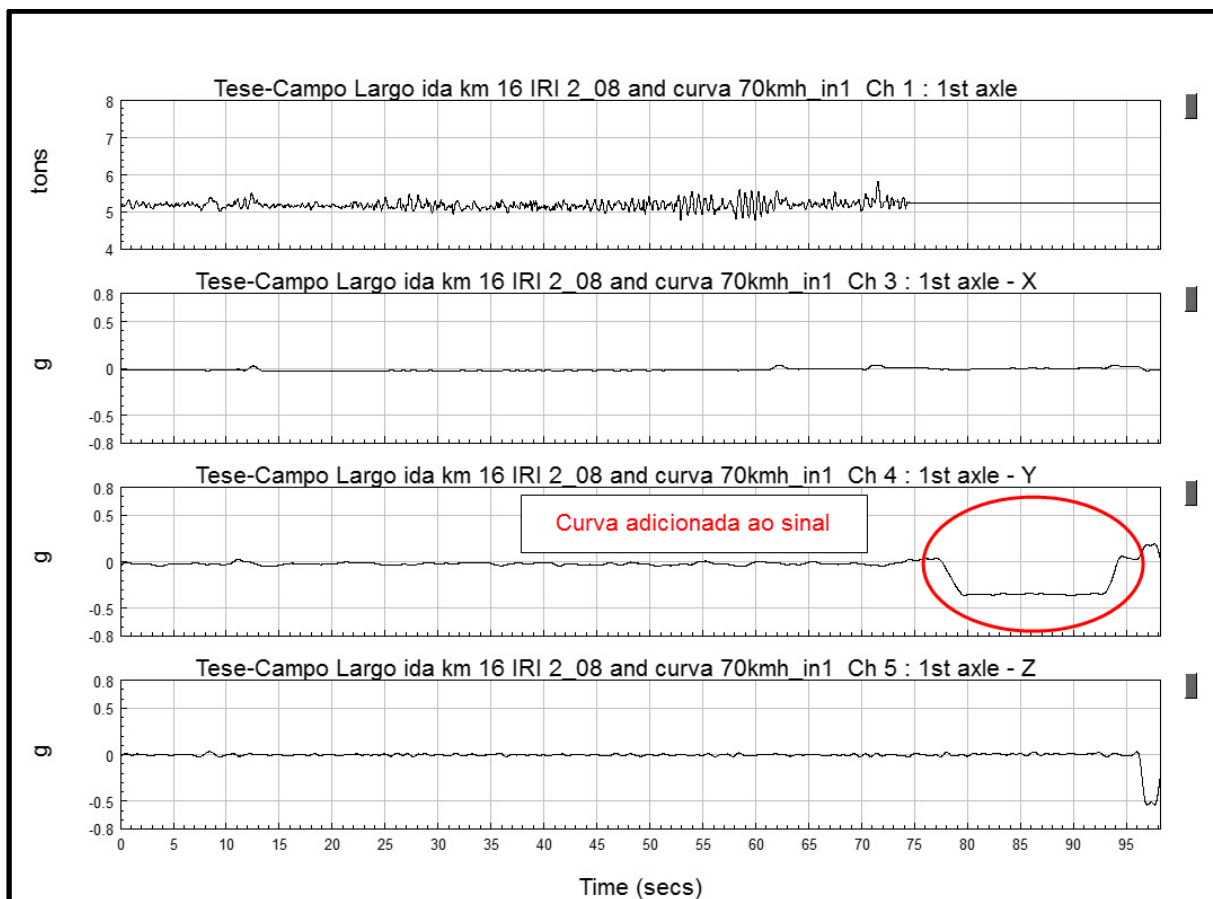


Figura 4-9 - Exemplo da adição de curva (70 km/h) em um trecho com IRI de 2,08 m/km.

Finalmente, é possível notar que as medições dos 174 km, em condições normais de tráfego (Figura 4-6), estão dentro dos limites definidos pelos eventos de frenagem adicionados nos trechos controlados – Figura 4-10. Isto é, a dispersão dos resultados está intimamente ligada aos eventos de frenagem.

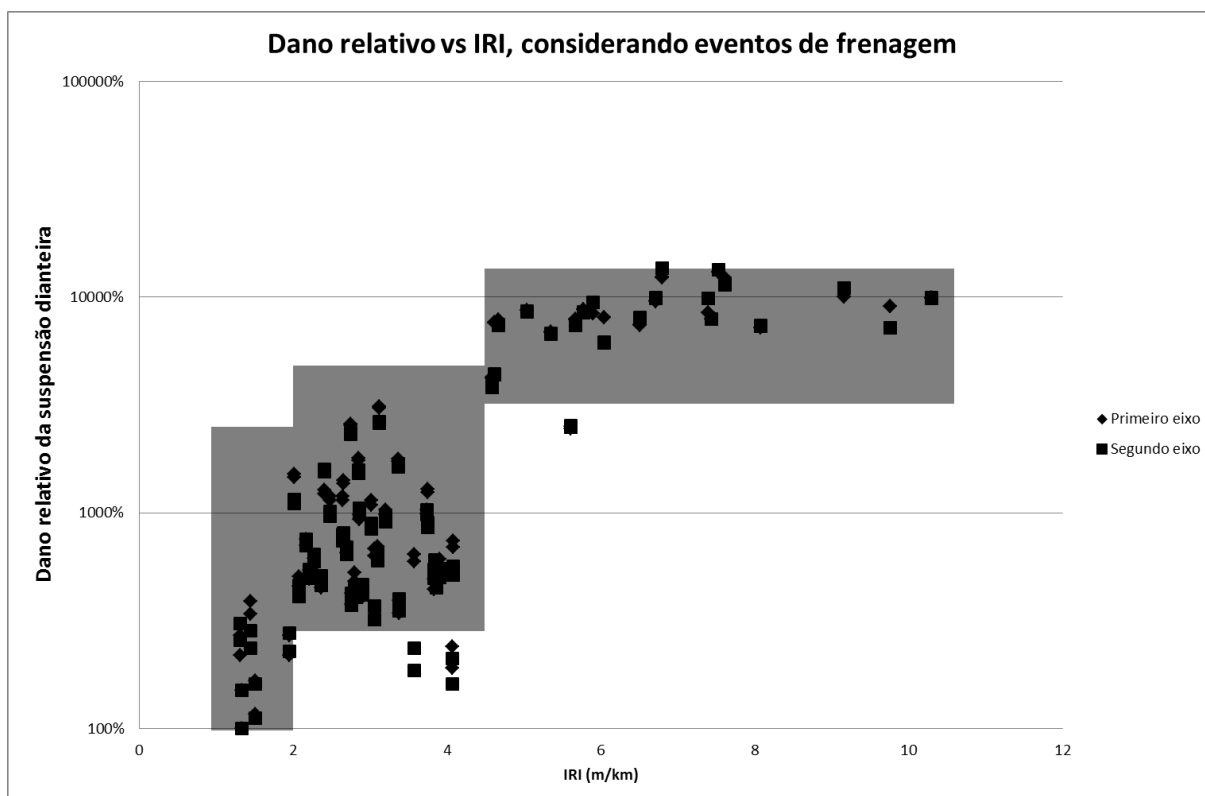


Figura 4-10 - Comparação entre Dano relativo e IRI - 174 km vs Trechos controlados.

Vale ressaltar ainda que a frenagem possui maior influência no dano relativo com IRIs baixos, devido ao fato de que esses eventos geram mais dano do que o próprio sinal original – baixo carregamento vertical aplicado ao pavimento. Analogamente, espera-se que IRIs com valores altos sejam menos impactados por frenagens.

Os resultados da influência do IRI na durabilidade da suspensão dianteira de um veículo comercial geraram o artigo *“Quantitative analysis of the influence of pavement longitudinal profile for a front suspension’s durability of a commercial vehicle”* (Anexo 6) submetido ao *Canadian Journal of Civil Engineering*.

4.5 Discussão dos Resultados

De modo geral, é possível dividir a análise dos resultados em relação ao carregamento do pavimento em eventos transientes (curva, frenagem e buraco) e o

efeito das irregularidades longitudinais do pavimento na durabilidade da suspensão primária dianteira de um veículo comercial.

Durante eventos de curva, para as delimitações utilizadas, é possível estimar a transferência de carga devido ao movimento de rolagem do veículo. Através das medições realizadas, pode-se afirmar que para cada incremento de 10 km/h (2,8 m/s) na velocidade do caminhão, uma carga adicional de 110 kg é adicionada ao carregamento estático aplicado ao pavimento.

Considerando-se uma velocidade constante de 70 km/h (19,4 m/s), para o carregamento definido pela resolução CONTRAN 12/98 para os eixos isolados com rodados simples, a sobrecarga no pavimento será de 25% a mais em relação ao seu valor estático, e 37% considerando-se a tolerância da regulamentação mencionada (10%).

A posição do pedal de freio possui uma significativa influência no carregamento vertical aplicado ao pavimento para valores acima de 60%. Por outro lado, a velocidade do veículo não apresenta diferenças significativas, o que significa, por exemplo, que frenagens de emergência (100% do pedal de freio aplicado) devem gerar transferência de cargas similares, independentemente da velocidade inicial do veículo (20, 50 ou 70 km/h – respectivamente: 5,6, 13,9 ou 19,4 m/s). Neste sentido, mesmo em velocidades baixas (20 km/h ou 5,6 m/s), e a partir de 60% do pedal de freio acionado, o veículo sobrecarrega o pavimento em cerca de 50% do seu valor estático – isto equivale à 9 toneladas considerando o valor nominal da resolução CONTRAN 12/98 e 9,9 toneladas com a tolerância de 10%.

A mesma análise pode ser feita com os resultados de passagem nos buracos, mas vale ressaltar que estes geraram os maiores carregamentos verticais aplicados ao pavimento. Para buracos com 80 mm de profundidade, a uma velocidade mínima de 40 km/h (11,1 m/s), houve uma transferência de carga de duas vezes o carregamento estático, isto é, 12 toneladas (12.000 kg). Novamente fazendo uma extrapolação com as tolerâncias estabelecidas pela resolução CONTRAN 12/98, ter-se-ia 13,2 toneladas (13.200 kg).

Através dos resultados dos eventos transientes, é possível construir a Tabela 4-4, onde são comparados os valores máximos de carregamento vertical aplicado ao pavimento, em suas condições mais críticas, e a extrapolação desses resultados em função da tolerância da regulamentação CONTRAN 12/98:

Tabela 4-4 - Sumário dos maiores carregamentos para cada evento.

Evento	CONTRAN 12/98	
	Nominal	Nominal + tolerância
Curva (70 km/h)	7.500 kg	8.200 kg
Frenagem (100% freio)	9.000 kg	9.900 kg
Buraco (80 mm)	12.000 kg	13.200 kg

Diante do exposto até o momento, fica evidente a influência de manobras usuais dos veículos comerciais no carregamento aplicado ao pavimento. Por outro lado, nesta Tese também analisou-se o impacto do pavimento sobre a durabilidade da suspensão dianteira do caminhão. Para tanto, foi utilizado o IRI como parâmetro de comparação.

Os valores de dano apresentados indicam claramente faixas de IRI em relação à severidade de aplicação para o veículo. Tais valores se assemelham àqueles propostos por Sayers, Gillespie e Queiroz (1986) e apresentados em outros trabalhos mais recentes (BERNUCCI et al, 2010).

A Tabela 4-5 apresenta a diferença de faixas de IRIs, com aqueles encontrados na literatura.

Tabela 4-5 - Comparação das faixas de IRI: Literatura vs Dados da Tese.

Condição do pavimento	IRI (m/km)	
	Literatura	Dados da Tese
Bom	$1 < \text{IRI} < 3,5$	$1 < \text{IRI} < 2$
Regular	$3,5 < \text{IRI} < 4,5$	$2 < \text{IRI} < 4,5$
Ruim	$\text{IRI} > 4,5$	$\text{IRI} > 4,5$

Outro ponto importante, que corrobora com os resultados dos eventos transientes, é o fato de que a manobra de curva não gera dano expressivo para a suspensão do caminhão, ao contrário dos eventos de frenagem, onde há elevados valores de transferência de carga. É importante enfatizar novamente que a influência da aplicação do freio será mais perceptível no resultado de dano, quanto menor for o IRI do pavimento, uma vez que o cálculo de dano leva em consideração os valores mais altos de carregamento.

Através do modelo da Figura 4-7, é possível construir a Tabela 4-6, que apresenta o nível de severidade, para a suspensão dianteira dos veículos comerciais, nas faixas de IRI encontradas na pesquisa, para trechos controlados.

Tabela 4-6 - Nível de severidade (dano) em função do IRI.

Condição do pavimento	Dados da Tese	Nível de severidade
Bom	$1 < \text{IRI} < 2$	Referência
Regular	$2 < \text{IRI} < 4,5$	443 à 615 %
Ruim	$\text{IRI} > 4,5$	> 6219 %

Pela Tabela 4-6, tomando-se como referência o menor dano calculado (menor nível de IRI medido), é possível notar que um pavimento em condições regulares pode gerar até 6 (seis) vezes mais dano do que um pavimento em boas condições. De maneira análoga, uma rodovia ruim possui severidade 62 (sessenta e duas) vezes maior do que a referência adotada.

5. CONCLUSÕES

Apesar dos baixos valores de transferência de carga em curva, tais resultados podem iniciar uma discussão acerca da necessidade de uma diferente forma de dimensionamento de pavimento flexível, ou adoção de um coeficiente de majoração, para as curvas circulares.

Essas medições foram as mais prejudicadas, uma vez que são poucos os campos de provas localizados no Brasil que autorizam os testes de veículos comerciais carregados e que, do ponto de vista de segurança, foi considerado totalmente inviável a repetição do procedimento adotado em rodovias públicas / privatizadas.

Os resultados de frenagens apresentaram altos valores de transferência de carga aplicada ao pavimento, bem como o fato de que esse evento não é influenciado pela velocidade do veículo. Desta forma, mesmo em baixas velocidades, há a possibilidade de obter cargas de até 9,7 toneladas, considerando aqui os valores regulamentados pela norma CONTRAN 12/98. Porém, é de conhecimento geral que, em algumas rodovias, os veículos trafegam com valores de sobrecarga muito superiores àquela definida pela legislação Brasileira. Esses resultados poderão, por exemplo, auxiliar no melhor entendimento / dimensionamento do pavimento de praças de pedágio, próximos a lombadas ou cruzamentos, onde há a necessidade obrigatória de frenagem do veículo.

Como mencionado no Capítulo sobre Metodologia, as velocidades foram baseadas na normal Mundial de homologação de sistema de freio (ECE R13). Desta forma, acredita-se que as situações mais críticas tenham sido consideradas para coeficientes de atrito da pista utilizada ($\mu = 0,8$).

Os resultados referentes aos buracos sugerem que a variação de profundidade dos mesmos tenha influência direta no carregamento aplicado ao pavimento. Por outro lado, a diferença desse parâmetro em função da velocidade é mais significativa em velocidades inferiores à 40 km/h, onde se atinge o pico de transferência de carga.

No Capítulo sobre Metodologia também fora mencionado a utilização de buracos construídos com dimensões definidas, uma vez que seria inviável o ensaio em rodovias com buracos reais e, além disso, variar suas profundidades. Desta forma, acredita-se na confiabilidade dos testes pela repetibilidade dos resultados e pelo controle das variáveis externas.

Essas conclusões evidenciam a severidade do carregamento dos veículos comerciais ao pavimento flexível. Em contrapartida, os dados desta Tese indicam que a irregularidade longitudinal também exerce grande influência na durabilidade da suspensão dianteira dos caminhões. Uma rodovia com um nível de IRI regular gera até 6 (seis) vezes mais dano ao sistema do que quando comparado à um pavimento em boas condições. Este dado não é tão alarmante quando a mesma comparação é feita com um pavimento em condições ruins, onde essa severidade sobe para, no mínimo, 62 (sessenta e duas) vezes.

A instrumentação desenvolvida se mostrou robusta o suficiente para suportar milhares de quilômetros. Além disso, ressalta-se o fato de que a metodologia desenvolvida pode ser aplicada em qualquer tipo de superfície: pavimentos flexíveis, rígidos e não-pavimentados.

Como conclusão final, pode-se afirmar que esta Tese atingiu o resultado almejado que era quantificar o impacto dinâmico vertical causado pelos veículos comerciais durante eventos transientes provenientes dos fatores da via, bem como pelo modo de condução dos veículos. As amplitudes dos carregamentos em curvas, frenagem e buracos sugerem que tais considerações sejam previstas no projeto de dimensionamento e manutenção preventiva dos pavimentos flexíveis.

Se por um lado há a necessidade de uma melhor análise no correto dimensionamento do pavimento considerando o comportamento dinâmico do caminhão, alerta-se também para o fato de que as montadoras de veículos comerciais precisam considerar a influência das condições de manutenção do pavimento em seu produto, de modo a criar procedimentos de testes que observem os níveis de irregularidade longitudinal de cada aplicação / mercado.

6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Desde Julho de 2011 até o presente momento, foram utilizados 5 veículos de testes com especificações e configurações distintas, acumulados mais de 4000 quilômetros de medições nas mais diferentes aplicações, o que resultou em aproximadamente 50 gigabyte de dados. Porém, apesar de todos os esforços para esgotar as possibilidades referentes ao tema deste estudo, são listadas abaixo sugestões para futuras pesquisas que não foram consideradas nesta Tese:

- adotar a mesma metodologia considerando-se curvas de raios e superelevação diferentes. Para este item faz-se necessário alertar os pesquisadores sobre o risco de tais manobras para à integridade dos ocupantes internos / externos ao veículo;

- instrumentar e calibrar, além das molas, os amortecedores de modo a verificar a influência desses componentes na transferência de carregamento vertical ao pavimento;

- repetir a mesma metodologia das análises de frenagem para pavimentos rígidos, ou flexíveis com diferentes coeficientes de atrito;

- repetir a mesma metodologia das análises dos buracos, adotando-se diferentes larguras destes eventos de modo a verificar a influência ao se tocar no fundo, ou na borda do mesmo;

- ainda sobre os eventos transientes, recomenda-se o estudo de duas (ou mais) variáveis que foram apresentadas nesta Tese, com o intuito de verificar a sobreposição dos resultados – ex: o comportamento das cargas durante a frenagem de um veículo ao cair em um buraco de 80 mm de profundidade;

- apesar dos 174 km de rodovias medidas, somente 21 km tinham condições necessárias para evitar a contaminação experimental. Desta forma, recomendam-se considerar outros trechos com medições controladas de velocidade do veículo, retilíneos e onde não seja necessário a aplicação do freio de serviço.

REFERÊNCIAS

ABDI, H., WILLIAMS, L. J.. **Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) Test**. In Neil Salkind (Ed.) Encyclopedia of Research Design. Thousand Oaks, CA: Sage, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. ANTT. **Idade Média dos Veículos Comerciais Brasileiros**. Brasília: 2015. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4969/RNTRC_em_Numeros.html>. Acesso em: 21 Setembro 2015.

AGUIAR, M. P. M.. **Sistema de análise de impacto utilizando acelerômetros uniaxiais**. 2011. 52 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Controle e Automação, Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto, 2011.

AHN, S.; KANDALA, S.; UZAN, J.. Impact of traffic data on the pavement distress predictions using the mechanistic empirical pavement design guide. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 1, p.195-216. 2011.

ALMEIDA, L. D. F.. **Análise de tensões e deformações em um corpo de prova "Compact Tension" experimentalmente por extensometria e teoricamente por MFEL**. 2002. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Unicamp, Campinas, 2002.

AL-QADI, L.; ELSEFI, M. A.; YOO, P. J.. Characterization of pavement damage due to different tire configurations. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 84, n. 1, p.921-962. 2005.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A.. **Exntesometria Básica**. Ilha Solteira: UNESP, 2004.

ASSOCIAÇÃO LATINO AMERICANA DE PNEUS E AROS. **ALAPA 2012-2013: Manual de Normas Técnicas**. São Paulo: 2013. 205 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. ANFAVEA. **50 anos de indústria automobilística Brasileira. São Paulo: 2006.** Disponível em: < <http://www.anfavea.com.br/50anos.html>>. Acesso em: 21 Janeiro 2015.

BARELLA, R. M.. **Contribuição para a Avaliação da Irregularidade Longitudinal de Pavimentos com Perfilômetros Inerciais.** 2008. 362 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica:** formação básica para Engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2010. 496 p.

BAYAT, A.; KNIGHT, M.. Field evaluation and analysis of flexible pavement structural responses under dynamic loads. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. 1, p.26-37. 2012.

BELAY, A.; OBRIEN, E. J.; KROESE, D.. Truck fleet model for design and assessment of flexible pavements. **Journal of Sound and Vibration**, p.1161-1174. 2007.

CALACHE, D. C.. **Caracterização de um acelerômetro baseado em sistemas microeletromecânicos (MEMS).** 2013. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CAUSEMANN, P.. **Automotive shock absorbers: features, designs and applications.** 1st ed., Berlin: Sachs, 2000. 70 p.

CEBON D. **Handbook of Vehicle-Road Interaction.** Lisse Abingdon: Swets & Zeitlinger. 1999.

CESBRON, J. et al. Influence of road texture on tyre/road contact in static conditions. **Road Materials and Pavement Design**, v. 9, n. 4, p.689-710, 2008.

CHE, F.; CHEN, S.; MA, Q.. Change regularity by FEM for dynamic response of structural layers of asphalt pavement with dynamic load. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMEDIA TECHNOLOGY. **Proceedings**. 2011. p. 1475-1478.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2014**. Brasília: 2014. 389 p.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **CONTRAN 210/06**: Limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Brasília: 2006. 7 p.

COSTA A. L. A.. **Caracterização do comportamento vibracional do sistema pneu-suspensão e sua correlação com o desgaste irregular verificado em pneus dianteiros de veículos comerciais**. 2007. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

DE BEER, M.; FISCHER C.; JOOSTER, F. J.. Determination of pneumatic tyre/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS, 8, 1997, Seattle. **Proceedings**. Seattle: ICAP, 1997. p. 179-227.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 005/2003**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro: 2003. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Limites legais**. Brasília: 1998. 139 p. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/qfv%20pdf.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Manual de pavimentação**. Brasília: 2006. 278 p. Disponível em:

<http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 24 out. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Sistema de Gerência de Pavimentos**: Resultados dos levantamentos de campo da malha rodoviária federal. Brasília: 2010. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Projetos Básicos e Executivo de Engenharia para Restauração, Manutenção e Conservação de Rodovia**. Brasília: 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER 173/86**: Método de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta. Brasília: 1986. 13 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. DETRAN. **Código de Trânsito Brasileiro**. Brasília: 2008. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/publicacoes/download/ctb_e_legislacao_complementar.pdf>. Acesso em: 01 Fevereiro 2015.

DOEBELIN, E.. **Measurement system: application and design**. 4th ed., New York: McGraw-Hill, 1990.

DOWLING, N. E.. Mean stress effects in stress-life and strain-life fatigue. **SAE Technical Paper**, Paper 2004-01-2227, 2004. doi: 10.4271/2004-01-2227.

DOWLING, N. E.. **Mechanical behavior of materials**: engineering method for deformation, fracture and fatigue. 4. ed. Nova Jersey: Pearson, 2012. 936 p.

ECONOMIC COMISSION FOR EUROPE. ECE. **R13**: European homologation of braking systems. United Nations, 2012. 1134 p.

ENDO, T.; MATSUSHI, M.. Fatigue of metals subjected to varying stress. **Japan Society of Mechanical Engineering**. 1968.

FERREIRA, H. T.. **Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em MatLab-Simulink**. 2003. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GALLEGOS, M. F. et al. Evaluation of contact force and pressure of heavy vehicle's supersingle tire versus dual tires. **SAE Technical Paper**, Paper 2010-01-1900, 2010.

GALLINA, R.. **Os extensômetros elétricos resistivos: evolução, aplicações e tendências**. 2003. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Judas Tadeu, São Paulo, 2003.

GILLESPIE, T. D. **Effects of heavy vehicles characteristics on pavement response and performance**. Ann Arbor: University Of Michigan, 1992. 109 p.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale: Society Of Automotive Engineers, Inc., 1992. 495 p.

GILLESPIE, T. D.; KARAMIHAS, S. M.; CEBON, D.. **Effects of heavy vehicles characteristics on pavement response and performance**. Michigan: The University of Michigan Transportation Research Institute, 1992.

GILLESPIE, T. D.; SAYERS, M. W.; SEGEL, L.. **Calibration and Correlation of Response-Type Road Roughness Measuring Systems**. Michigan: Highway Safety Research Institute, 1980. 290 p.

GRAVE, S. **Modeling of site-specific traffic loading on short to medium span bridges**. 2001. Tese (Doutorado) - Trinity College Dublin - Irlanda, 2001.

HANNAH, R. L.; REED, S. E.. **Strain gage user's handbook**. London: Chapman & Hall. 1992.

HOFFMANN, K.. **An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges**. Pfungstadt: Hotting Baldwin Messtechnik GmbH (HBM), 2012.

HUANG, Y. **Pavement Analysis and Design**. New Jersey: Pearson Prentice Hall. 2nd ed. 767 p.

JAZAR, R. N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application**. New York: Springer. 3rd ed. 2009.

KIM, D.; SALGADO, R.; ALTSCHAEFFL, A. G.. Effects of supersingle tire loading on pavements. **Journal of Transportation Engineering**, p.732-743. 2005.

KUBO, P. Y. Y.. **Análise prospectiva do desenvolvimento do produto nas indústrias automobilísticas de veículos comerciais instaladas no Brasil**. 2009. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2009.

LIMA, V. A.; GARBIN, L.; SANTOS NETO, C. R.. Lateral Dynamics Simulation of a Truck with Modified Rear Suspension. **SAE Technical Paper**, Paper 2012-36-0020, 2008.

LIU, C.; WANG, Z.. Influence of joints on ride quality and roughness index. **Road Materials and Pavement Design**, v. 9, n. 1, p.111-121. 2008.

LIU, Y.; YOU, Z.. Fundamental study on pavement-wheel interaction forces through discrete element simulation. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 6, n. 6, p.689-695. 2013.

LMS. **LMS Scadas Recorder for Durability**. Bélgica: 2013. 6 p.

LU, Y. et al. Numerical and experimental investigation on stochastic dynamic load of a heavy duty vehicle. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, n. 10, p.2698-2710. 2010.

LUO, R.; PROZZI, J. A.. Strain distribution in the asphalt layer under measured 3-D tire-pavement contact stresses. **Road Materials and Pavement Design**, v. 8, n. 1, p.61-86, 2007.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M.. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 297 p.

MINER, M. A.. Cumulative Damage in Fatigue. **Jounal Of Applied Mechanics**. p. 159-164. 1945.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. C.. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NASCIMENTO, L. C.. **Protocolo de comunicação CAN e suas aplicações na indústria automobilística**. 2006. 51 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, 2006.

NEWLEND, D. E.. An introduction to random vibration and spectral analysis, 2nd Ed., Longman, New York, N.Y., 104-129.

NORMAN, O. K.; HOPKINS, R. C. Weighing vehicles in Motion. **31st Annual Meeting of Highway Research Board**. Washington, USA.

OBRIEN, E. J.; ENRIGHT, B.. Modeling same-direction two-lane traffic for bridge loading. **Structural Safety**, v. 33, n. 4-5, p.296-304. 2011.

OLIVEIRA, A. et al. Tire pressure impact on structural durability tests results. **SAE Technical Paper**, Paper 2008-36-0041, 2008.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. OECD. **Dynamic interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE)**. Paris: 1998. 151 p.

PIRCHER, M. et al. Damage due to heavy traffic on three RC road bridges. **Engineering Structures**, v. 33, n. 12, p.3755-3761. 2011.

POULIKAKOS, L. D. et al. In situ measurements of the environmental footprint of freight vehicles in Switzerland. **Transportation Research Part D Transport and Environment**, v. 13, n. 4, p.274-282. 2008.

PREM, H.; ROD, G. and McLean, J. Methods for evaluating the dynamic-wheel-loading performance of heavy commercial vehicle suspensions. Presented in International symposium on heavy vehicle weights and dimensions, 5th, 1998. p. 252-78.

REY, L.. **Planejar e redigir trabalhos científicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1993. 318 p.

ROBINSON, R.; THAGESEN, B.. **Road engineering for development**. 2. ed. Londres: Spon Press, 2004. 514 p.

RODRIGUES, J. R. et al. Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: Uma revisão atual. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA INERCIAL, 6., 2010, Rio de Janeiro. **Paper**. São José dos Campos: Sbein, 2012. p. 1 - 6.

RODRIGUES, J. N.. **Caracterização Estática e Dinâmica de um Sensor de Forças/Momentos**. 2012. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

SACHIKO, A. L.. **Engenharia da Qualidade**. Curitiba: UFPR, 2012.

SAWANT, V.. Dynamic analysis of rigid pavement with vehicle-pavement interaction. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 10, n. 1, p.63-72. 2009.

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; PATERSON, W. D. O.. **Guideline for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements**. Washington D. C: Banco Mundial, 1986. 98 p.

SAYERS, M. W.; GILLESPIE, T. D.; QUEIROZ, C. A. V.. The International Road Roughness Experiment: establishing correlation and a calibration standard for measurements. **World Bank Technical Paper**, v. 1, n. 45, p.1-453. 1986.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M.. **The Little Book of Profiling**: basic information about measuring and interpreting road profiles. Michigan: University Of Michigan, 1998. 100 p.

SHIH, S.; BENNETT, J.; BALDWIN, S.; BASAS, J.; SOMNAY, R.. Product Development Cycle Time Re-duction with FEA - A New Consideration. **SAE Technical Paper**, Paper 982805, 1998. <http://dx.doi.org/10.4271/982805>.

SIDDHARTHAN, R. V. et al. Investigation of tire contact stress distributions on pavement response. **Journal of Transportation Engineering**, p.136-144. 2002.

SILVA, W. J. S.; ASSIS, W. S.. Monitoração estrutural e instrumentação virtual aplicados ao ensino experimental de Engenharia Civil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 40., 2012, Belém. **Anais**. Maceió: COBENG, 2012. p. 1 - 12.

SOARES, R. F. et al.. A computational model for predicting the effect of tire configuration on asphaltic pavement life. **Road Materials and Pavement Design**, v. 9, n. 2, p.271-289, 2008.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE. **SAE J1939 Standards Collection on the Web**. 2015. Disponível em: < [http:// http://store.sae.org/j1939/contents/](http://store.sae.org/j1939/contents/)>. Acesso em: 09 Outubro 2015.

SUN, Y.; ZHANG, M.; ZHAO, F.. Reflective cracking response of asphalt concrete under vehicle loading. In: MECHANIC AUTOMATION AND CONTROL ENGINEERING, 2, 2011. **Proceedings**. 2011. p. 2422-2425.

SWETT, L.; MALLICK, R. B.; HUMPHREY, D. N.. A study of temperature and traffic load related response in different layers in an instrumented flexible pavement. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 9, n. 5, p.303-316. 2008.

SZURGOTT, P.; KWASNIEWSKI, L.; WEKEZER, J. W.. Dynamic interaction between heavy vehicles and speed bumps. In: EUROPEAN CONFERENCE ON MODELING AND SIMULATION, 23, 2009, Madrid. **Proceedings**. Madrid: ecms, 2009. p. 179-227.

TAHERI, A.; OBRIEN, E. J.; COLLOP, A. C.. Pavement damage model incorporating vehicle dynamics and a 3D pavement surface. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 13, n. 4, p.374-383. 2012.

TAPIA, P.; KUMARA, M. W.; TIA, M.; WU, C. L.; CHOUBANE, B.. Evaluation of composite pavements using a heavy vehicle simulator. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 1, n. 1, p.1-11. 2008.

VOLVO. **Atlas da Acidentalidade no Transporte Brasileiro**. Curitiba: 2014. 117 p.

WANG, H.; AL-QADI, I. L.. Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking. **Road Materials And Pavement Design**, v. 11, n. 1, p.101-121, 2010.

WANG, G.; ROQUE, R.. Impact of wide-based tires on the near-surface pavement stress states based on three-dimensional tire-pavement. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 3, p.639-662, 2011.

WANG, J.; YU, H. S.. Shakedown analysis for design of flexible pavements under moving loads. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n. 3, p.703-722. 2013.

WEN, J.. FEA Modeling Verification and Validation: Correlating Model with Test Data by Optimization Analysis. **SAE Technical Paper**, Paper 2007-01-1745, 2007. <http://dx.doi.org/10.4271/2007-01-1745>.

WU, J.; LIANG, J.; ADHIKARI, S.. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 1, n. 6, p.439-447. 2014.

XUE, W.; WANG, D.; WANG, L.. A review and perspective about pavement monitoring. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 5, p.295-302. 2012.

YANG, Y. S. et al. Binzhou perpetual test road: dynamic response of pavement under very heavy loads. **Road Materials And Pavement Design**, v. 10, n. SL, p.151-165. 2009.

YODER, E.; WITCZAK, M.. **Principles of pavement design**. 2. ed. West Lafayette: John Wiley & Sons, Inc., 1975.

ZHANG, Y.; ZHANG, X.. Dynamic response analysis of pavement and subgrade of highway. In: EUROPEAN CONFERENCE ON MULTIMEDIA TECHNOLOGY, 2011. **Proceedings**. ECMT, 2011. p. 1034-1036.

ZHU, S. P.; HUANG, H. Z.; WANG, Z. L.. Fatigue life estimation considering damaging and strengthening of low amplitude loads under different load sequences using fuzzy sets approach. **The International Journal of Damage Mechanics**, v. 20, n. 6, p.876-899. 2011.

ANEXO 1

Artigo: *“A review about methodologies to estimate vertical load applied to the pavement”*, submetido ao *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, em 05/10/2015.

Original research paper

A Review about Methodologies to Estimate Vertical Load Applied to the Pavement

Pablo Kubo^{1,*}, Cassio Paiva¹, Arthur Larocca², Joshua Dawson³

¹Department of Civil Engineering, State University of Campinas (UNICAMP), Campinas, Brazil

² Department of Engineering, Alpha Serviços de Assessoria Técnica Ltda, Curitiba, Brazil

³Department of Engineering, Volvo Trucks North America, Greensboro, USA

Abstract

Vertical load from commercial vehicles is the main factor analyzed for pavement design, on traditional or mechanistic-empirical approach, due to its relation with strain / stress on pavement layers.

This paper presents the methodology applied by researchers to estimate the vertical load applied to the pavement with virtual and physical measurements. This methodology keeps reliability and cost as key items for an ideal conclusion.

Keywords:

Truck; Pavement; Vertical Load; Methodology

*Corresponding author. Tel.: +55 41 91145783

E-mail: pyykubo@hotmail.com (Pablo Kubo, PhD Candidate, Engineer).

1 Introduction

The wheel loads of heavy trucks contribute to various forms of pavement distress (GILLESPIE et al 1992).

According to Taheri, Obrien and Collop (2012), the traditional approach of pavement life assessment considers all axle weights and calculates the number of equivalent axles of standard weight (8.2 tons). The afore mentioned authors add that the method does not explicitly calculate the local effect of dynamic oscillation of axle forces about the static weight of the axle.

Wu, Liang and Adhikari (2014) emphasize that, static uniform loading is most commonly used on pavement structures for mechanical analysis and calculations, which is reasonable for conditions such as low speed and small amount of loading, but moving vehicles on the road produce a complex vertical force to the pavement.

On the other hand, Mechanistic-Emperical (M-E) methods for the design of pavement have gained significant interest according to Bayat and Knight (2012). The response models that predict pavement response under traffic loads are the core component of the M-E design procedure.

The objective of this article is to present state-of-the-art studies related to estimation of the vertical load applied to the pavement.

The text is divided between virtual and physical measurements done with instrumented trucks and instrumented pavement. Also, a background of the forces applied to the pavement is presented in terms of a quarter car model and the movement equations involved.

1.1 Quarter car model:

Fig. 1 presents a quarter car model with all the parameters that would affect the vertical load applied to the pavement.

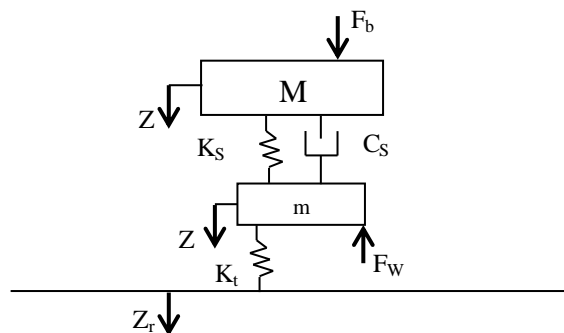


Fig. 1 Quarter car model (Adapted from Gillespie, 1992).

Where:

M: sprung mass (vehicle chassis and suspended elements);

Z: vertical displacement of the sprung mass;

F_b: vertical force of the sprung mass (for example: applied force during braking);

K_s: primary suspension spring rate;

C_s: shock absorber damping force;

m: unsprung mass (axles, tyres and wheels);

Z_u: vertical displacement of the unsprung mass;

F_w: vertical force of wheel/tyre applied to the unsprung mass;

K_t: vertical tyre stiffness;

C_t: tyre damping force;

Z_r: pavement roughness.

According to Jazar (2009), the most employed and useful model of a vehicle suspension can be characterized from the equations of kinetic energy (K), potential energy (V) and dissipation function (D):

$$K = \frac{1}{2} M \dot{Z}^2 + \frac{1}{2} m \dot{Z}_u^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} k_s (Z - Z_u)^2 + \frac{1}{2} k_t (Z_u - Z_r)^2 \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} c_s (\dot{Z} - \dot{Z}_u)^2 \quad (3)$$

Employing the Lagrange method,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{Z}} \right) - \frac{\partial K}{\partial Z} + \frac{\partial D}{\partial \dot{Z}} + \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{Z}_u} \right) - \frac{\partial K}{\partial Z_u} + \frac{\partial D}{\partial \dot{Z}_u} + \frac{\partial V}{\partial Z_u} = 0 \quad (5)$$

Results in the equation of motion of the quarter car model:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Z} \\ \ddot{Z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{Z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ Z_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Z_r k_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

Also represented in terms of equations (CEBON, 1999; LIU and WANG, 2008).

$$M_s \ddot{Z}_s + K_s(Z_s - Z_u) + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) = 0 \quad (7)$$

$$M_s \ddot{Z}_s + m_u \ddot{Z}_u + C_t(\dot{Z} - \dot{Z}_u) = k_t(Z_r - Z_u) \quad (8)$$

Although this model does not represent longitudinal and lateral interconnections, it covers the most basic characteristics of the real problem and offers a proper representation of the controlling wheel and wheel-body load variations (JAZAR, 2009).

2 Methodologies to estimate the vertical load applied to the pavement

2.1 Instrumented pavements

Some Government and private initiatives were done, in a limited number of countries in order to understand the behavior of the existencing fleet impact on the pavement.

According to Xue, Wang and Wang (2012) the weigh-in-motion (WIM) system was presented to the society by the studies of Norman and Hopkings (1952) and its technology is being developed in terms of sensors, procedure for instrumentation and data acquisition.

Swett, Mallick and Humphrey (2008) described the instrumentation of a flexible pavement section located in Maine (USA).

Fig. 2 presents the schematic of layers and instrumentation adopted.

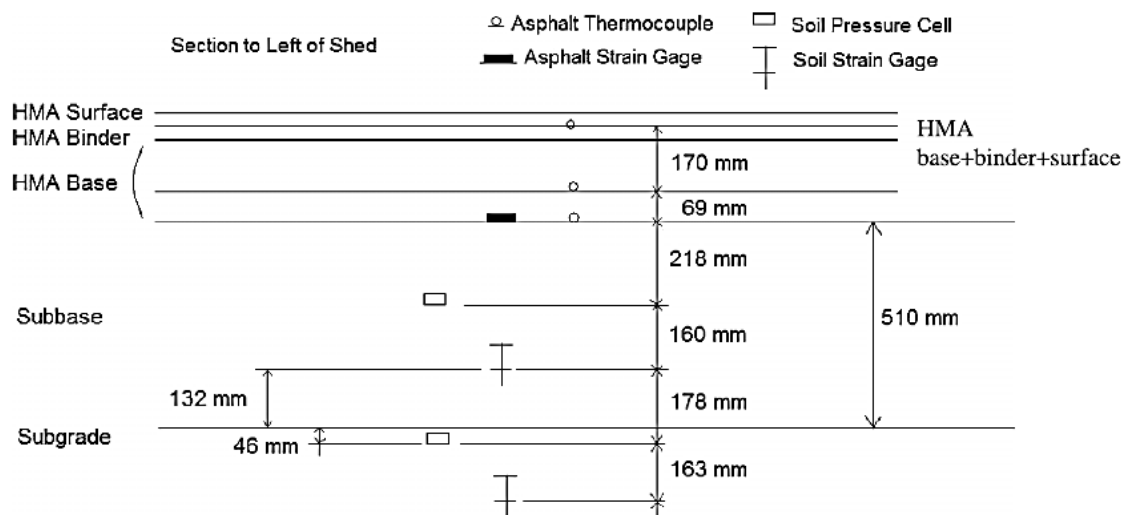


Fig. 2 Schematic of layers and instrumentation (Swett, Mallick and Humphrey, 2008).

Soil pressure cell: the internal transducer has a full strain gauge bridge, and is temperature compensated for the range of 15 to 150° C. It has a service life of over 3 years and a fatigue life of

over three million cycles. The pressure cell is rated to record pressures from 10 to 200 kPa.

Soil strain gauge: consists of a linear variable differential transformer (LVDT) that can measure both permanent and dynamic change in soil. It is necessary to calibrate the sensor, in order to correlate gauge extension to voltage output.

Hot mix asphalt (HMA) strain gauge: 120 Ω quarter bridge sensor with a range up to 1500 microstrain.

As the main drawback, the authors highlighted that the method of installation will have a noticeable effect on the results and lifetime of the sensors. Even with careful installation, many sensors were damaged or presented unreliable data during the measurements.

Similar instrumentation was done in Shandong province, China (YANG et al, 2009) and in Florida (TAPIA et al, 2008).

All pavement instrumentation, performed in US and China, assumed the truck wheel path in order to place the sensors. Data was recorded with single trucks with very specific conditions, such as speed and load.

Bayat and Knight (2012) present the study of a field test facility located in Ontario (Canada), where sensors were installed to measure asphalt and soil strain, vertical stress, soil moisture content, and pavement temperature.

Fig. 3 shows the instrumented section profile and sensor distribution layout: ASG (asphaltic strain gauge), TPC (total pressure cell), T (thermocouples) and TDR (time domain reflectometer).

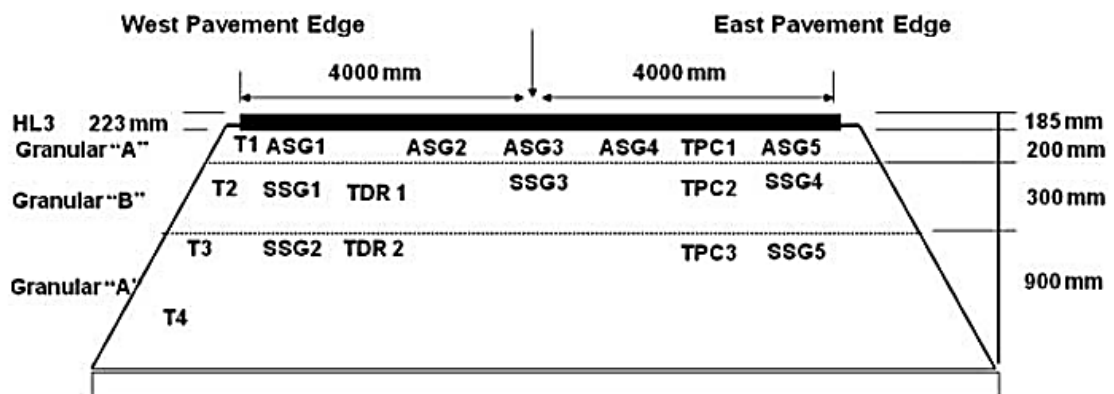


Fig. 3 Instrumented section profile and sensor distribution layout (Bayat and Knight, 2012).



Fig. 4 Truck used for field test (Bayat and Knight, 2012).

Fig. 5 shows TPC1 vertical stress when the truck and trailer passed over ASG5 at a speed of 25 km/h with 49 kN of wheel load.

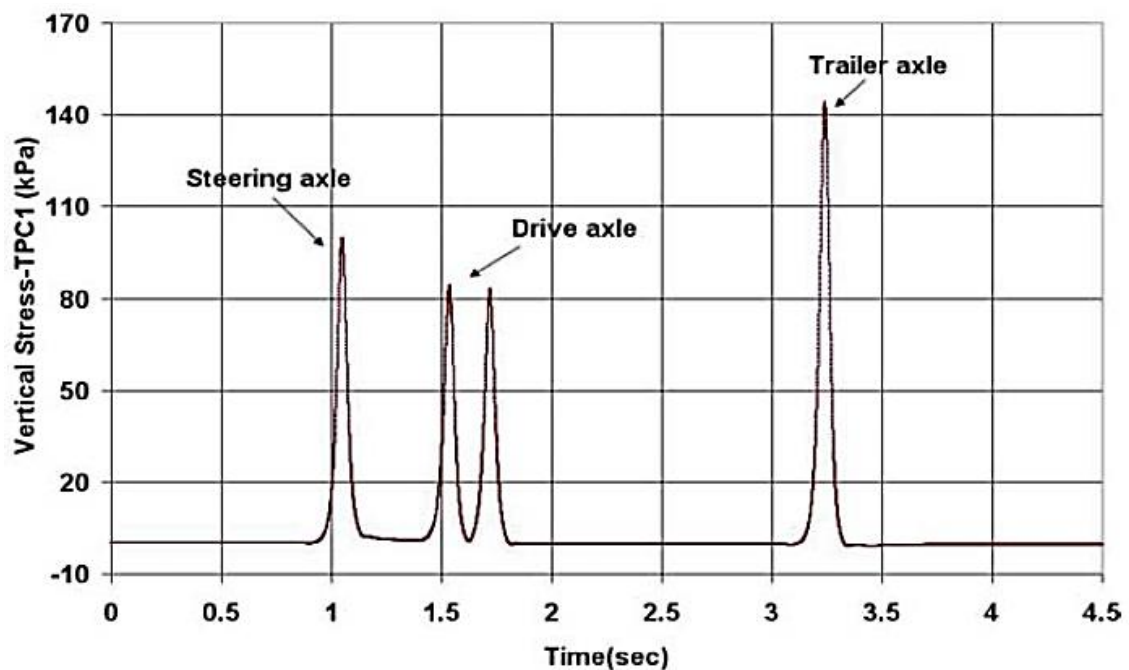


Fig. 5 Total pressure cell (TPC1) response during the passing of the truck and trailer loads (Bayat and Knight, 2012).

A different approach was placed in Switzerland (POULIKAKOS et al, 2008) and it refers to footprint monitoring stations (FMS).

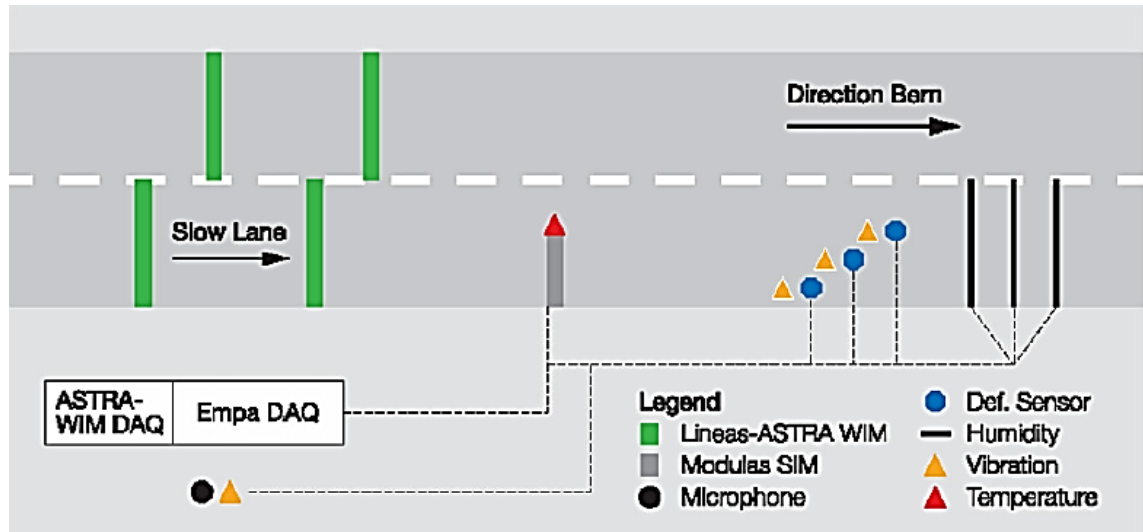


Fig. 6 Schematic of a footprint monitoring stations - FMS (Poulikakos et al, 2008).

The instrumented pavement include sensors such as axle and wheel loads, pavement deformation, vibration, noise, temperature and humidity – Fig. 6.

An important aspect of the FMS is the possibility to record data from the real traffic, as the weight in motion monitoring (WIM).

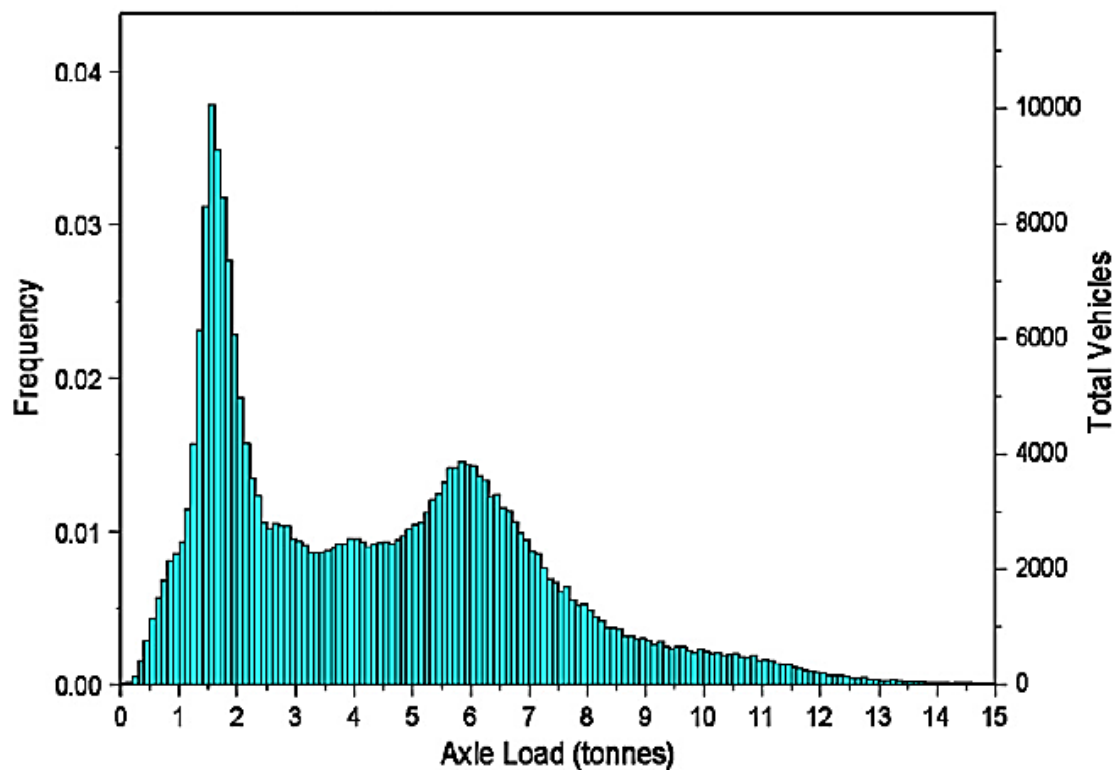


Fig. 7 Histogram of axle weights recorded on VIM during September 2005 (Poulikakos et al, 2008).

The Switzerland WIM sensor recorded 3,700 heavy vehicles per day providing axle load, gross vehicle weight (GVW) above 3 tons, speed, axle distance and vehicle length. Figure 7 provides

noticeable peaks of 1.5 tons/axle (empty trucks) and 6 tons/axle (laden trucks).

On Fig. 7, it is noticeable peaks on 1.5 tons/axle (empty truck) and 6 tons/axle (laden front axle).

Ahn, Kandala and Uzan (2011) present the results of a study in Arizona using conventional traffic data and national default values, in the absence of weight-in-motion (WIM) data. One of the conclusions was the default national average for axle load distribution factors differed from the site-specific values. However, the default values of number of axles per truck were fairly close to the site-specific values.

2.2 Virtual analysis

Even though FEA has accelerated the development cycle, some difficulties in its accuracy are still a constraint in the use of this technique (WEN, 2007; SHIH et al., 1998). FEA still utilizes too many assumptions and simplifications.

One example of correlation between FEA and physical tests has been done by Szurgott, Kwasniewski and Wekezer (2009). These researchers created a simplified, 3D FE model to quantify the loads applied by the truck when passing over a speed bump (transient event).

Fig. 8 presents the tractor and -trailer composition used during the analysis.

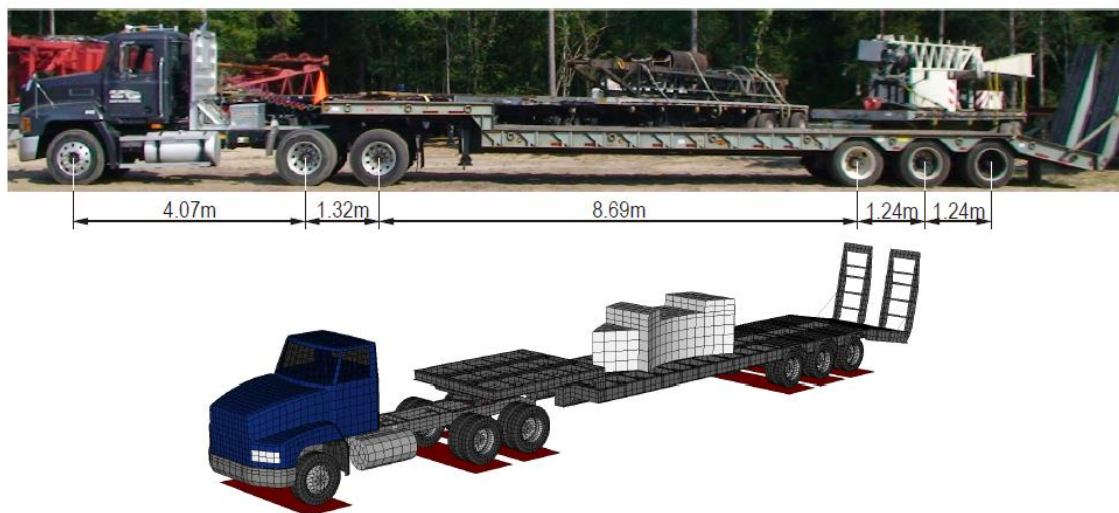


Fig. 8 Selected tractor and semi-trailer – Real and virtual models (Szurgott, Kwasniewski and Wekezer, 2009).

During the correlation measurements, the vehicle was dropped off a 75 mm wooden plank placed under the wheels – Fig. 9. The vertical displacement between frame and the axle was measured using a linear displacement sensor. In addition, accelerometers were placed on the axles and body of the vehicle.

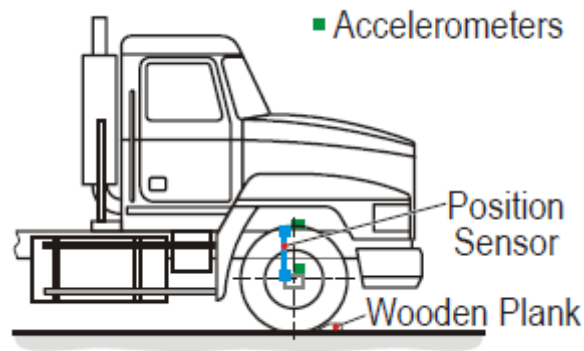


Fig. 9 Instrumentation and theoretical model (Szurgott, Kw asniew ski and Wekezer, 2009).

The authors used a one degree of freedom system – Fig. 10. Therefore, following the equations in order to determine spring stiffness k_i and damping coefficient c_i :

$$k_i = \frac{4\pi^2}{\tau_d^2} m_{bi} \quad (9)$$

Where:

T_d : period of the damped vibration and,

m_{bi} : sprung mass

$$c_i = 2 \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \sqrt{k_i m_{bi}} \quad (10)$$

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{(i+1)}} \quad (11)$$

Where:

δ : logarithmic damping decrement and,

u : amplitude.

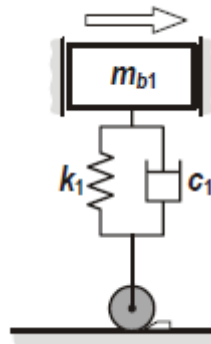


Fig. 10 One degree of freedom system (Szurgott, Kw asniew ski and Wekezer, 2009).

Fig. 11 shows the FEA results after the correlation with physical tests. The chart presents the load profiles over a speed bump among static load, 16 km/h, 24 km/h, 32 km/h and 48 km/h.

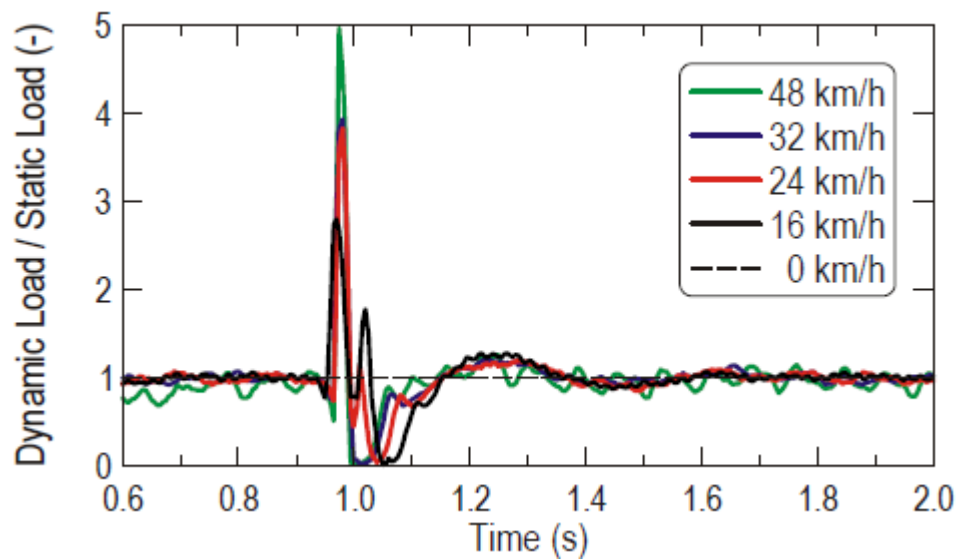


Fig. 11 FEA dynamic loads with different speeds over a speed bump (Szurgott, Kw asniew ski and Wekezer, 2009).

Liu and You (2013) created a discrete element model for pavement-wheel interaction and analyzed its behavior on acceleration / deceleration maneuvers.

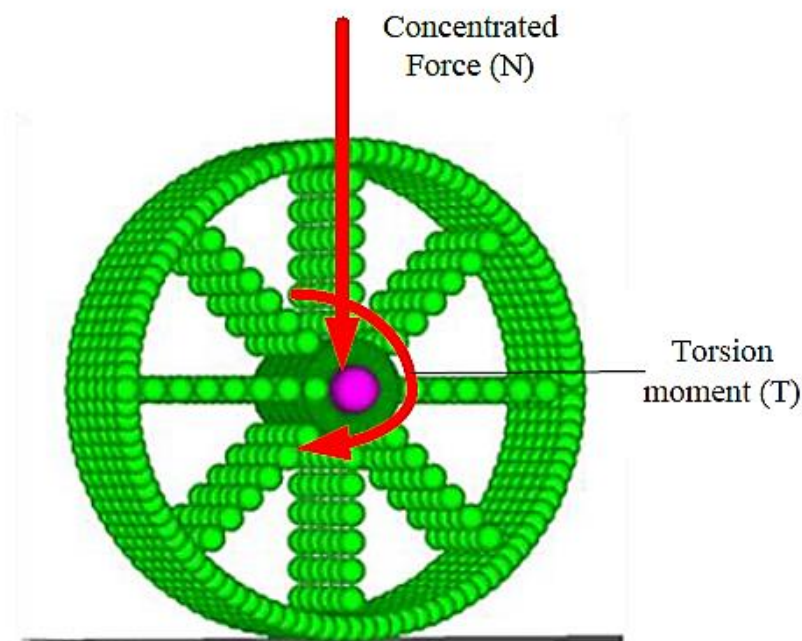


Fig. 12 Motion feature of a rolling wheel (Liu and You, 2013).

The results showed that vertical forces are strongly related to positive acceleration. A rear wheel was analyzed in the aforementioned case, thus the strong correlation of load with acceleration. – Fig. 13.

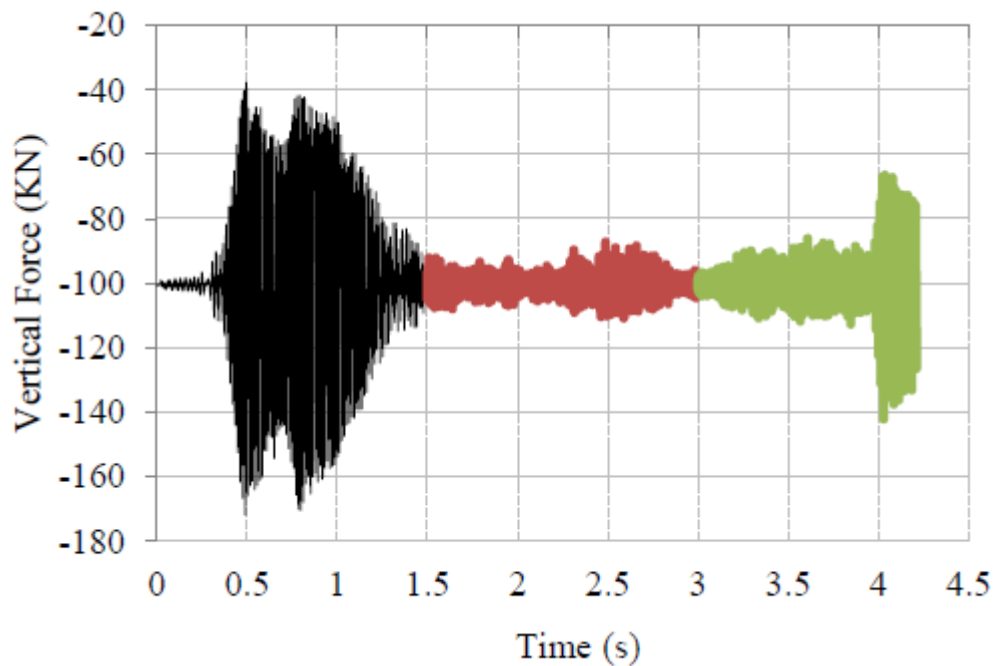


Fig. 13 Vertical compressive forces vs Loading time – Acceleration, Steadily moving and Deceleration (Liu and You, 2013).

Some mathematical expressions have been, derived based on assumptions in order to quantify the vertical load applied to the pavement by the commercial vehicles.

Wang and Yu (2013) used the simplified assumption that the load is applied by an infinitely long roller – Fig. 14 - in order to calculate the normal load applied to the pavement on 2D and 3D plane strain pavement models.

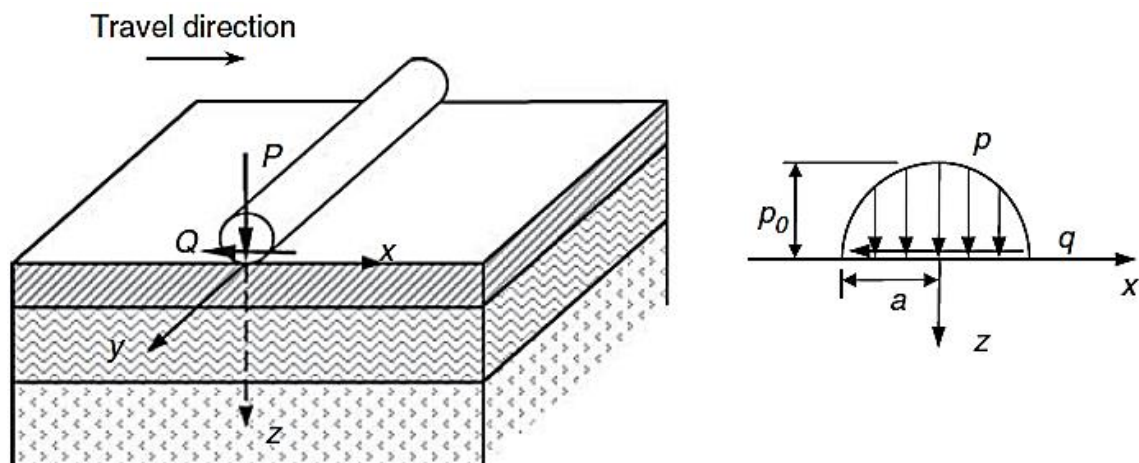


Fig. 14 Pavement under a 2D moving load (Wang and Yu, 2013).

$$p = \frac{2P}{\pi a^2 (a^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

Where:

p: normal load distribution

a: half of the contact width,

P: total normal load per unit length applied in the vertical direction

Another simplified form is to consider the dynamic load as a semi-sinusoidal distribution.

$$F(t) = P_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{T} \right) \quad (13)$$

Where:

T: loading period and,

P₀: static load.

$$T = \frac{12a}{v} \quad (14)$$

Where:

a: radius of tire contact area and,

v: vehicle speed

Transferring the Eq. (13), the Eq. (15) is obtained (Sun, Zhang and Zhao, 2011; Che, Chen and Ma, 2011; Wu, Liang and Adhikari, 2014):

$$q(t) = q_{\max} \sin^2 \left(\frac{\pi}{T} \right) \quad (15)$$

Zhang and Zhang (2011) suggested a more complex model which considers the stiffness of the spring and a geometric irregularity as a hole or bump.

$$F(t) = (P_0 + m_0 \propto \omega^2) |\sin(\omega t)| \quad (16)$$

Where:

m₀: spring stiffness;

α: geometric irregularity vector height and,

ω: vibration circular frequencies.

$$\omega = \frac{2\pi v}{l} \quad (17)$$

Where:

v: vehicle speed and,

l: wavelength (vehicle body).

Sawant (2009) emphasizes that most of the available analytical solutions neglect dynamic interaction between the moving loads and the pavement.

Taheri, Obrien and Collop (2012) adopted the vehicle parameters of quarter car - Table 1.

Table 1. Vehicle parameter of quarter car model (Adapted from Taheri, Obrien and Collop, 2012).

Vehicle Parameter	Mean	Standard Deviation
Unsprung mass	420 kgf Cebon (1999) Belay et al (2007)	40 kgf Belay et al (2007)
Sprung mass	4535 kgf Obrien and Enright (2011)	500 kgf Obrien and Enright (2011)
Spring stiffness	1,000,000 N/m Cebon (1999) Belay et al (2007)	100,000 N/m Belay et al (2007)
Damping forces	20,000 Ns/m Cebon (1999) Belay et al (2007)	2,000 Ns/m Belay et al (2007)
Tire stiffness	1,950,000 N/m Cebon (1999) Belay et al (2007)	200,000 N/m Belay et al (2007)

A comparison between the values from Table 1 and data from the front suspension of an 8x2 rigid truck is presented on Table 2.

Table 2. Vehicle parameters of quarter car model – Comparison between literature and real values.

Vehicle Parameter	Literature values	Real values of a front suspension
Unsprung mass	420 ±40 kgf	590 kgf
Sprung mass	4535 ± 500 kgf	5,410 kgf
Spring stiffness	1,000,000 ± 100,000 N/m	210,000 ± 12,600 N/m
Damping forces	20,000 ± 2,000 Ns/m	Table 3
Tire stiffness	1,950,000 ± 200,000 N/m	889,041 N/m

Table 3. Damping forces – Comparison between literature and real values.

Shock absorber rod speed	Literature value	Real values of a front suspension	
		Rebound	Compression
0.052 m/s	20,000 ± 2,000 Ns/m	20,190 ±4,040 Ns/m	8,650 ±1,730 Ns/m
0.130 m/s		15,380 ±3,080 Ns/m	4,380 ±850 Ns/m
0.260 m/s		9,420 ±1,420 Ns/m	2,500 ±380 Ns/m
0.390 m/s		7,180 ±720 Ns/m	1,920 ±280 Ns/m
0.520 m/s		5,950 ±600 Ns/m	1,690 ±250 Ns/m

2 Discussions

Simulation seems to be the most common tool for vertical load prediction used by the researchers, but various assumptions have been used for their analysis.

The mathematical model for pavement is similar within all papers found currently, but the mathematical model does not apply for the vehicle model. The assumption and simplification goes from a very simple sinusoidal signal, with no influence of the suspension, transforming to a complex quarter car model simulation. From a heavy truck point of view, even the complex models of vehicle suspension parameters are not technically feasible.

One important vehicle parameter that must be emphasized is the damping forces from the shock absorber. In the literature, the damping is considered a constant coefficient, sometimes not even considered at all. On real applications, the shock absorber damping forces vary with travel speed. The input from the pavement is directly related to the travel of the shock absorber, which may have different values for compression and rebound (traction).

Another method to verify the vertical load (strain / stress) applied to the pavement is to instrument a patch of pavement and measure the input loading. This type of methodology allows quantifying the loads from real trucks, but an important drawback is the influence of the wheel track on the results due to the sensor positioning. Other drawbacks to pavement testing methodology are the significant role longitudinal roughness plays on the suspension loading and the maintenance cost of upkeep of these measurement sections.

Finally, the possibility of measuring the vertical loads applied to the pavement with an instrumented vehicle does exist. Currently only one paper was found, but in relation to afore mentioned methods it is established that this type of methodology would have some positive factors:

- cost in relation to the instrumented pavement;
- possibility to define its own wheel track;
- possibility to test in different roads longitudinal profiles and traffic conditions;
- real vehicle parameters.

With this scenario, it is reasonable to expect more studies with instrumented vehicles, in order to determine the real vertical load applied to the pavement. Those data could be useful for virtual analysis, in order to have a more reliable result with minimal simplification of the mathematical models.

References

- Ahn, S., Kandala, S., Uzan, J., 2011. Impact of traffic data on the pavement distress predictions using the mechanistic empirical pavement design guide. *Road Materials and Pavement Design*. 12(1), 195-216.
- Bayat, A., Knight, M., 2012. Field evaluation and analysis of flexible pavement structural responses under dynamic loads. *Road Materials and Pavement Design*. 13(1), 26-37.
- Belay, A., Obrien, E. J., Kroese, D., 2007. Truck fleet model for design and assessment of flexible pavements. *Journal of Sound and Vibration*. 1161-1174.
- Cebon, D. 1999. *Handbook of Vehicle-Road Interaction*. Lisse Abingdon: Swets & Zeitlinger.
- Che, F., Chen, S., Ma, Q., 2011. Change regularity by FEM for dynamic response of structural layers of asphalt pavement with dynamic load. In *Proceedings of International Conference on Multimedia Technology*, 1475-1478, 2011
- Gillespie, T. D., 1992. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrandale: Society of Automotive Engineers.
- Gillespie, T. D., 1992. Effects of heavy vehicles characteristics on pavement response and performance. Ann Arbor: University Of Michigan, 109 p.
- Grave, S., 2001. Modeling of site-specific traffic loading on short to medium span bridges, Ph. D. thesis, Trinity College Dublin, Ireland.
- Huang, Y., 1994. *Pavement Analysis and Design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall. 2nd ed. 767 p.
- Jazar, R. N., 2009. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. 3rd ed., New York: Springer.
- Liu, C., Wang, Z., 2008. Influence of joints on ride quality and roughness index. *Road Materials and Pavement Design*. 9(1), 111-121.
- Liu, Y., You, Z., 2013. Fundamental study on pavement-wheel interaction forces through discrete element simulation. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 6(6), 689-695.
- Norman, O. K., Hopkins, R. C., 1952. Weighing vehicles in Motion. 31st Annual Meeting of Highway Research Board, Highway Research Board, Washington, DC, USA.

- O'Brien, E. J., Enright, B., 2011. Modeling same-direction two-lane traffic for bridge loading. *Structural Safety*. 33 (4-5), 296-304.
- Poulikakos, L. D. et al., 2008. In situ measurements of the environmental footprint of freight vehicles in Switzerland. *Transportation Research Part D Transport and Environment*. 13 (4), 274-282.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D.; Queiroz, C. A. V., 1986. The International Road Roughness Experiment: establishing correlation and a calibration standard for measurements. *World Bank Technical Paper*. 1 (45), 1-453.
- Sayers, M. W., Karamihas, S. M., 1998. *The Little Book of Profiling*. Michigan: University of Michigan. 100 p.
- Sawant, V., 2009. Dynamic analysis of rigid pavement with vehicle-pavement interaction. *International Journal of Pavement Engineering*. 10(1), 63-72.
- Shih, S.; Bennet, J., Baldwin, S., Basas, J., Somnay, R. Product Development Cycle Time Reduction with FEA - A New Consideration. *SAE Technical Paper 982805*, 1998.
<http://dx.doi.org/10.4271/982805>.
- Sun, Y., Zhang, M.; Zhao, F., 2011. Reflective cracking response of asphalt concrete under vehicle loading. In *Proceedings of 2nd Mechanic Automation and Control Engineering*, 2422-2425.
- Swett, L., Mallick, R. B., Humphrey, D. N., 2008. A study of temperature and traffic load related response in different layers in an instrumented flexible pavement. 9 (5), 303-316.
- Szurgott, P., Kwasniewski, L., Wekezer, J. W., 2009. Dynamic interaction between heavy vehicles and speed bumps. In *Proceedings of 23rd European Conference on Modeling and Simulation*.
- Taheri, A., O'Brien, E. J., Collop, A. C., 2012. Pavement damage model incorporating vehicle dynamics and a 3D pavement surface. *International Journal of Pavement Engineering*. 13 (4), 374-383.
- Tapia, P., Kumara, M. W., Tia, M., Wu, C. L., Choubane, B., 2008. Evaluation of composite pavements using a heavy vehicle simulator. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 1 (1), 1-11.

Wang, J., YU, H. S., 2013. Shakedown analysis for design of flexible pavements under moving loads.

Road Materials and Pavement Design. 14 (3), 703-722.

Wen, J. FEA Modeling Verification and Validation: Correlating Model with Test Data by Optimization

Analysis. SAE Technical Paper 2007-01-1745, 2007. <http://dx.doi.org/10.4271/2007-01-1745>.

Wu, J., Liang, J., Adhikari, S., 2014. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt

isolating layer under moving loads. Journal of Traffic and Transportation Engineering. 1 (6), 439-447.

Xue, W., Wang, D., Wang, L., 2012. A review and perspective about pavement monitoring.

International Journal of Pavement Research and Technology. 5(5), 295-302.

Yang, Y. et al., 2009. Binzhou perpetual pavement test road. Road Materials and Pavement Design.

10 (SI), 151-165.

Zhang, Y.; Zhang, X., 2011. Dynamic response analysis of pavement and subgrade of highway. In

Proceedings of ICMT (International Conference on Multimedia Technology), 1034-1036.

Contact information

Pablo Yugo Yoshiura Kubo – Ph.D. in Mechanical Engineering (UNESP) and Ph.D. Candidate in Civil Engineering (UNICAMP) – Senior Product Development Engineer at Volvo Trucks in Brazil

E-mail: pyykubo@hotmail.com

Adress: Rua Joao Dembinski, 371 cs 40, 81270-330 – Curitiba – PR – Brazil

Phone number: +55 41 9114-5783

ANEXO 2

Artigo: *“Methodology to quantify the real vertical load applied to the pavement”*, submetido ao *International Journal of Pavement Research and Technology*, em 14/05/2015.

Methodology to Quantify the Real Vertical Load Applied to the Pavement

Pablo Yugo Yoshiura Kubo¹⁺, Cassio Eduardo Lima de Paiva¹, Arthur Eduardo de Freitas Larocca² and Joshua Dawson³

¹Department of Civil Engineering, University of Campinas, Campinas 13083-852, Brazil

²Department of Engineering, Alpha Technical Services, Curitiba 80520-590, Brazil

³Chassis and Vehicle Dynamic Engineering, Volvo Group North America, Greensboro NC 27409, United States of America

⁺Corresponding Author: E-mail: pyykubo@hotmail.com, Telephone: +55 41 9274-7661

Abstract: Highway networks attend to society as routes for personal and commercial transports. Reoccurring loads, especially in the vertical direction, imposed by the wheels of vehicles are assumed to deteriorate the pavement structure during its usage. The evaluation of vertical loading inputs and their effects on the pavement become critically important considering road transportation and its correct maintenance, especially when there are few studies based on actual measurements. Finally, the vertical load applied to the pavement can be simulated with market available software. Contrary to the most presentations, these are rarely correlated with actual measurements. The main objective of this paper is to present a proposal of a methodology to quantify, experimentally, the vertical load applied to the pavement in road transportation. Using metal-foil strain gauge instrumentation, measurements were performed using a rigid body vehicle on a public highway. The highway, located in the state of Paraná (Brazil), has a known IRI (International Roughness Index - a standard scale for road roughness). Measurements were also performed in proving grounds with correlated inputs. Using instrumented leaf springs as calibrated transducers, reaction load from typical highway events (such as speed bumps, braking, corners, lane changes and pot holes) were recorded and correlated.

Key words: Vertical Load; Measurement; Pavement; Truck.

1. Introduction

1.1 General remarks

Currently, vertical load applied to the pavement can be simulated with market available software (TruckSim®, Adams®), but the correlation with real measurements are not always presented. The high cost of pavement instrumentation is believed to inhibit these types of measurements.

The following literature presents some research regarding vertical load applied to the pavement on European roads [1], Chinese roads [2], virtual analysis of simplified mathematical models [3-5], or even analysis that does not consider the longitudinal pavement roughness within its research [6]. Most of the afore mentioned material does not consider specific traffic conditions, events, braking, or driver diversity.

The objective of this paper is to present a proposal of methodology to quantify the vertical load applied to the pavement based on real application.

The hypothesis is derived based on the fact that the real application depends on different vehicles, events, driver inputs, and traffic conditions to directly affect the vertical loading applied to the pavement. By utilizing real world environments, this hypothesis is different than other research performed.

1.2 Quarter car model

Figure 1 presents a quarter car model with all the parameters that would affect the vertical load applied to the pavement [7].

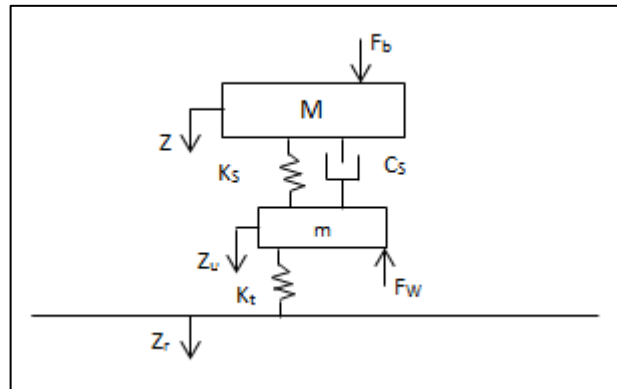


Figure 1 - Quarter car model.
Source: Adapted from Gillespie [7]

Where:

M: sprung mass (vehicle chassis and suspended elements);

Z: vertical displacement of the sprung mass;

F_b : vertical force disturbance of the sprung mass (for example: applied force during braking);

K_s : primary suspension spring rate;

C_s : shock absorber damping force;

m: unsprung mass (axles, tyres and wheels);

Z_u : vertical displacement of the unsprung mass;

F_w : vertical force disturbance regarding wheel/tyre applied to the unsprung mass;

K_t : vertical tyre stiffness;

C_t : tyre damping force;

Z_r : pavement roughness.

According to Jazar [8], the most employed and useful model of a vehicle suspension can be characterized from the equations of kinetic energy (K), potential energy (V) and dissipation function (D):

$$K = \frac{1}{2} M \dot{Z}^2 + \frac{1}{2} m \dot{Z}_u^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} k_s (Z - Z_u)^2 + \frac{1}{2} k_t (Z_u - Z_r)^2 \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} c_s (\dot{Z} - \dot{Z}_u)^2 \quad (3)$$

Employing the Lagrange method,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{Z}} \right) - \frac{\partial K}{\partial Z} + \frac{\partial D}{\partial \dot{Z}} + \frac{\partial V}{\partial Z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{Z}_u} \right) - \frac{\partial K}{\partial Z_u} + \frac{\partial D}{\partial \dot{Z}_u} + \frac{\partial V}{\partial Z_u} = 0 \quad (5)$$

Results in the equation of motion of the quarter car model:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Z} \\ \ddot{Z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -C_s \\ -C_s & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{Z}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ Z_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Z_r k_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

Although this model does not represent longitudinal and lateral interactions, the model does cover the most basic characteristics of the real problem and offers a proper representation of the controlling wheel and wheel-body load variations [8].

Figure 2 presents the displacement of the sprung / unsprung mass by a given undulation of the surface. Causermann [9] emphasizes that the displacement of the unsprung mass – basically the deformation of the tire – can be considered irrelevant when compared to the displacement of the sprung mass – spring unit.

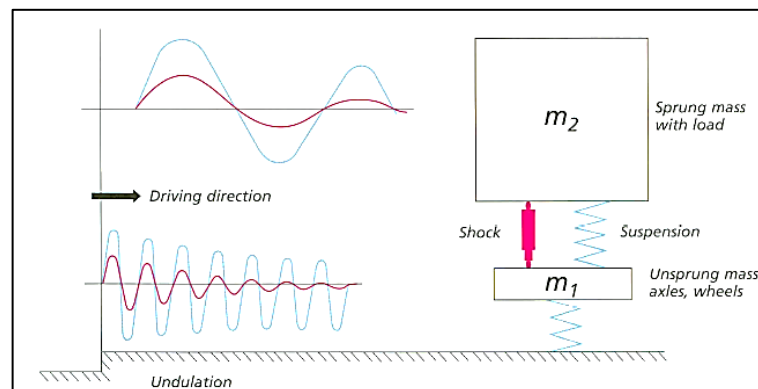


Figure 2 - Coupled vibrations of chassis and body masses.
Source: Causemann [9]

When the vehicle encounters a bump, suspension springs and shock absorbers are compressed. The resulting shock to the vehicle will be absorbed by the suspension. The suspension prevents a contact between the sprung mass (m_2 : body and payload) and the unsprung mass (m_1 : axle and wheels). The springs strive to

release stored energy by relaxing themselves again, so in order to mitigate this recoil action between axle and body, the chassis needs to be equipped with vibration dampers.

The same damping logic can be applied to pothole events. On an ideal road, the pavement would exist without imperfections. In this case, it would be expected that the load applied to the ground would be equal to the static load (Figure 3), but by the time the tire encounters pothole all sprung mass will compress both shock absorber and spring unit, in effect, imposing a vertical force on the ground (Figure 4) greater than its static load. It will be followed by an opposite sprung mass movement (upwards), due to the spring unit. It is important to highlight that the vertical force on the ground will be less than the static load, but not zero. This non-zero load is caused by the shock absorber mitigating the loss of contact between tire and ground (Figure 5).

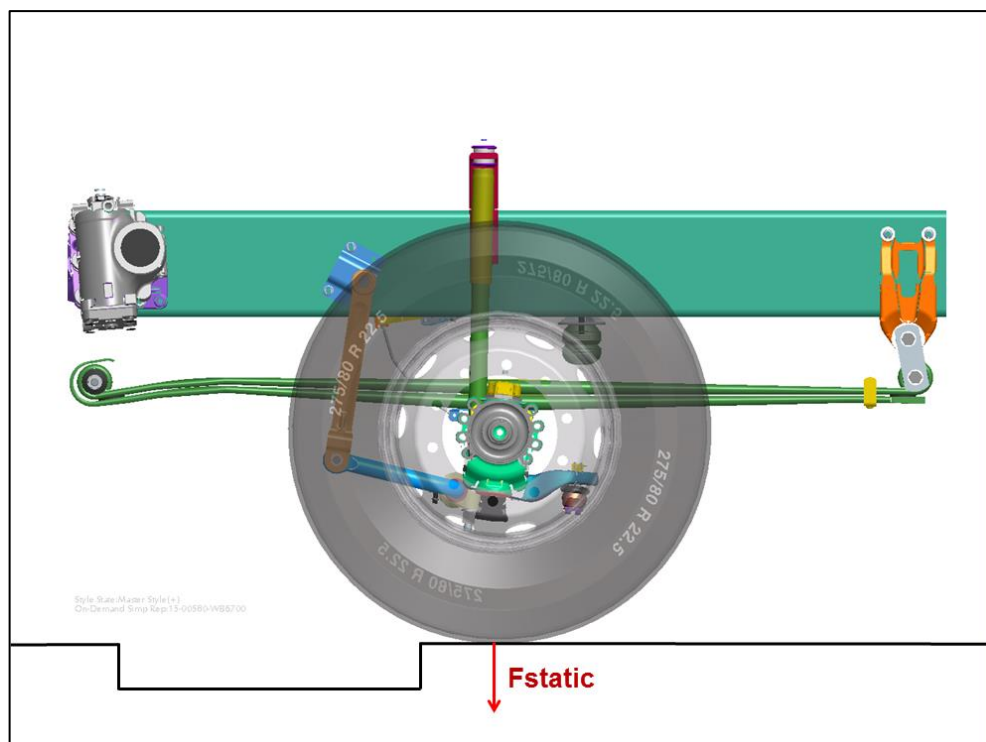


Figure 3 - Static load applied to the pavement.

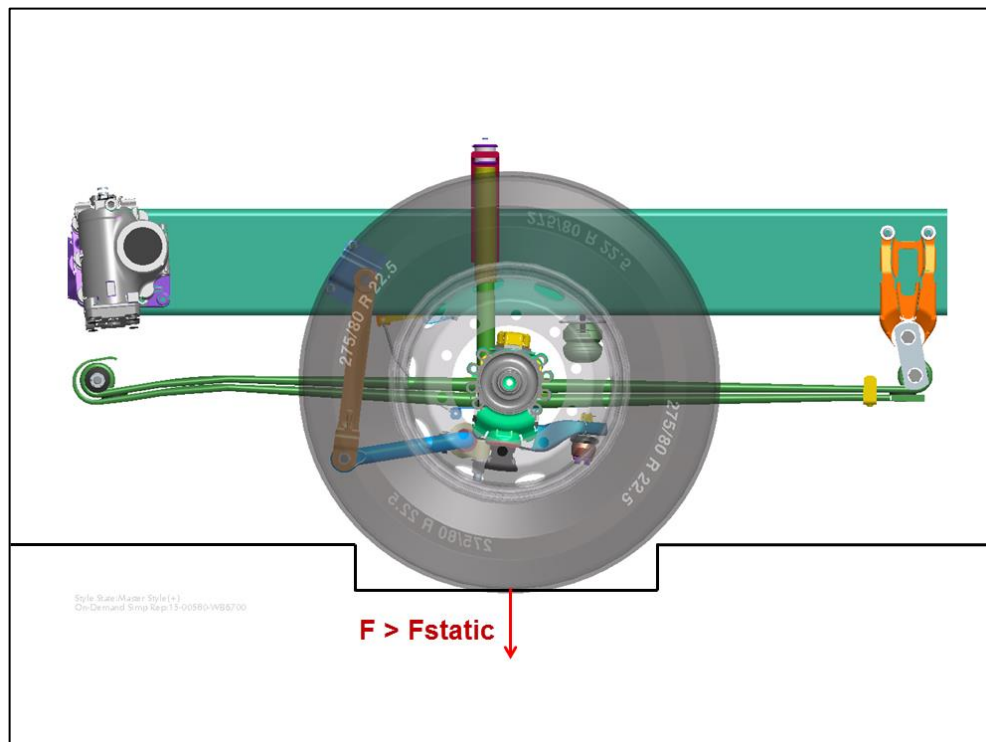


Figure 4 - Dynamic vertical load applied to the pavement – F higher than static load.

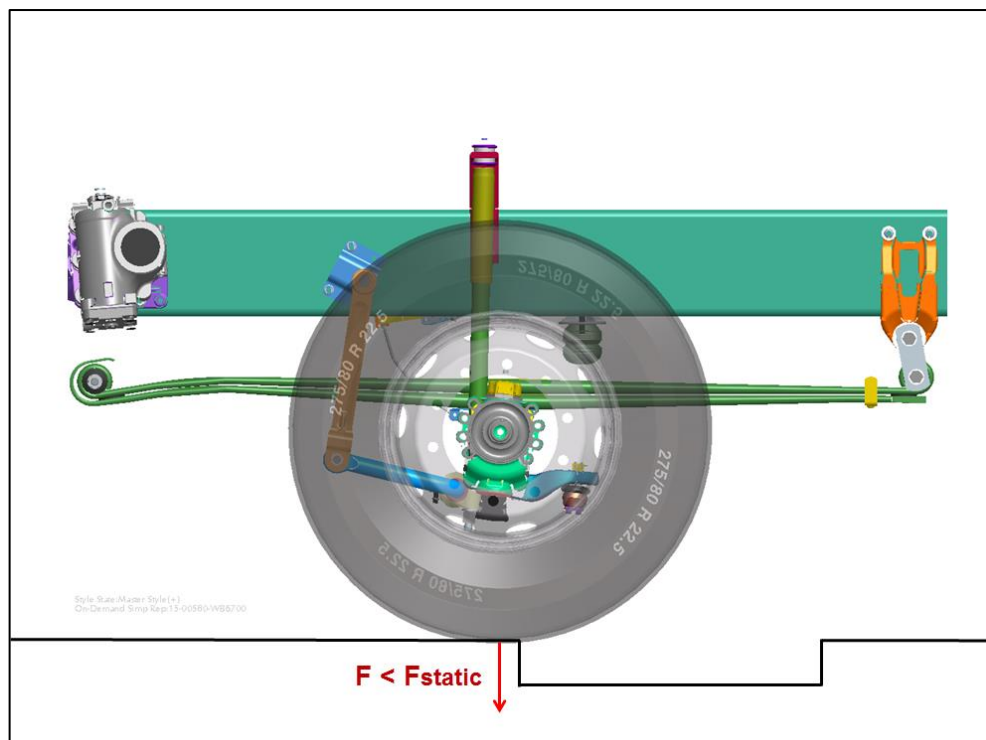


Figure 5 - Dynamic vertical load applied to the pavement - F lower than static load.

1.3 Metal-foil strain gauge

The metal-foil strain gauges (Figure 6 – [10]), also identified as foil strain gauges, are sensors composed by a small printed circuit, fixed on an electrical insulation material - usually epoxy, phenolic, epoxy-phenolic, or polyimide families - called backing. Foil gauges are manufactured by a precision photo etching process which permits many identical gauges of exact size and geometry to be formed at the same time. This process also provides complete freedom in two dimensions for the design of single- and multiple-grid gauges with optimum geometry [11].

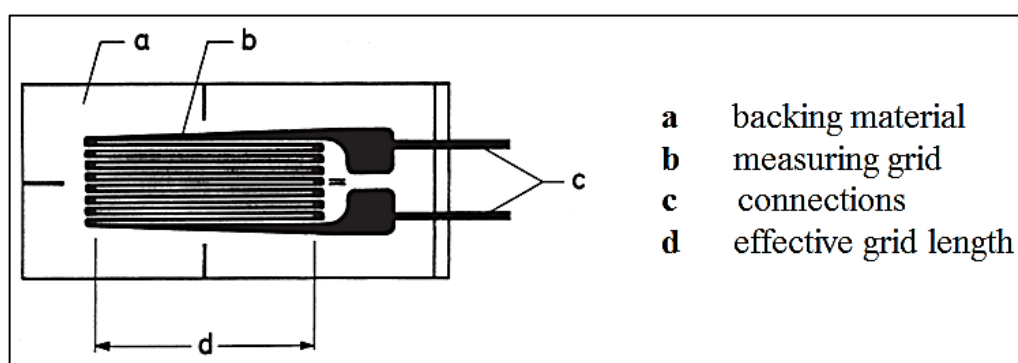


Figure 6 - Illustration of metal-foil strain gauge.
Source: Adapted from Hoffman [10].

These foil gauges, in general, are applied in two different types of tasks: in experimental stress analysis of machines, structures and components and in construction of force, torque, pressure, flow and acceleration transducer [12].

The working principle of this strain gauge is based on the strain/resistance relationship of electrical conductors, discovered by Charles Wheatstone and William Thomson. It states that any electrical conductor changes its resistance with mechanical stress, e.g. through tension and compression forces [10].

This characteristic is stated in the Ohm's Second Law, which relates the resistance (R) of a conductor to its length (L), cross-sectional area (A) and resistivity (ρ).

$$R = \frac{\rho \times L}{A} \quad (7)$$

According to Doebelin [12], to find how a change dR in R depends on the basic parameter, it is necessary to differentiate Eq. (7):

$$dR = \frac{A(\rho dL + L d\rho) - \rho L dA}{A^2} \quad (8)$$

Since volume $V = AL$ and $dV = A dL$:

$$dV = L(1 + \varepsilon)A(1 - \varepsilon\vartheta)^2 - AL \quad (9)$$

Where strain is given by ε and Poisson's ratio by ϑ .

Since $\varepsilon \triangleq dl/L$ is small, $(1 - \vartheta\varepsilon)^2 \approx 1 - 2\vartheta\varepsilon$, and Eq. (9) becomes:

$$- 2 \vartheta AdL = LdA \quad (10)$$

Substituting in Eq. (8):

$$dR = \frac{\rho AdL + LAd\rho + 2\vartheta\rho AdL}{A^2} \quad (11)$$

Re-arranging and dividing by Eq. (7):

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L}(1 + 2\vartheta) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (12)$$

Finally:

$$\text{Gage Factor} \triangleq \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\vartheta + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} \quad (13)$$

The Eq. (13) presents the principle of the resistance strain gauge. With a known gauge factor, the measurement of dR/R allows the measurement of the strain values (dL/L) [10].

In strain gauging technique, this relative change in resistance (dR/R) is measured through the Wheatstone bridge circuit (Figure 7). This is due to the gauge's versatility and its capacity to detect small changes in resistance (usually around the order of 10^{-4} to $10^{-2} \Omega/\Omega$) with great accuracy [10].

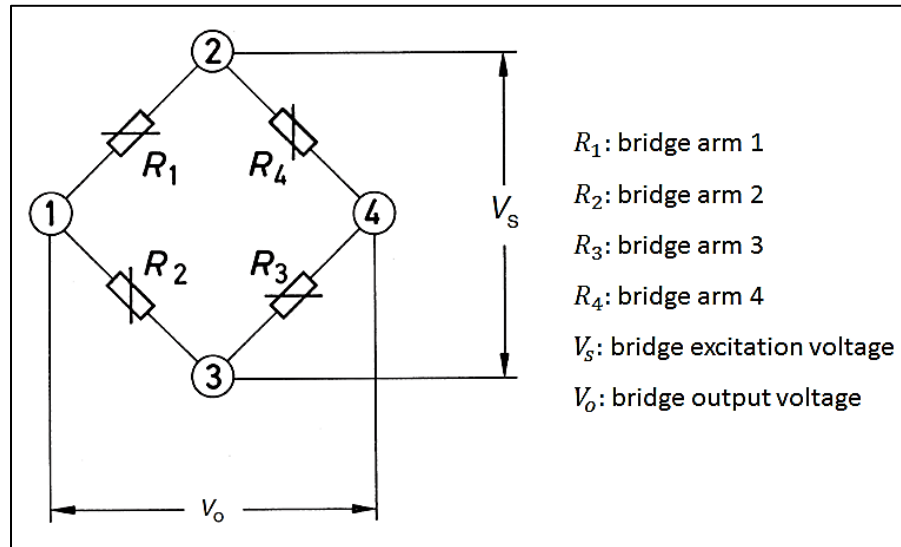


Figure 7 - Representation of the Wheatstone bridge circuit.
Source: Adapted from Hoffman [10].

The four arms of the bridge are formed by the resistances R_1 to R_4 . The corner points 2 and 3 designate the connections for the bridge excitation voltage V_s , while the bridge output voltage V_o (measurement signal) is available on the corner points 1 and 4 [10].

Several arrangements of strain gauges and resistances are possible in this circuit ($\frac{1}{4}$ bridge, $\frac{1}{2}$ bridge and full bridge), each one with a specific application. The Figure 8 illustrates the full-bridge arrangement, the same used in this methodology.

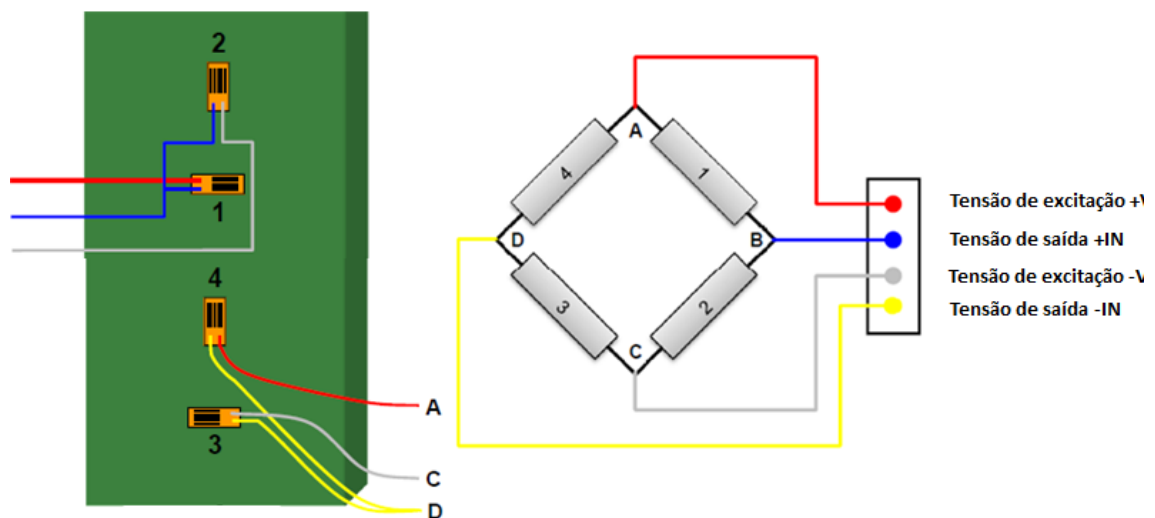


Figure 8 - Strain gauge with full-bridge arrangement.
Source: Adapted from Andolfato [10].

Finally, the result is obtained by associating the strain to an output voltage or current given by an amplifier, which subsequently can be processed in an electronic data system [10].

2. Methodology

2.1 Correlation vehicle

An 8x2 rigid truck (2 steering front axles, 1 drive axle and 1 tag axle – Figure 9) with the following specifications has been used for the measurements: 6 tons per axle on the front suspension; 295/80 R22.5 tire size and 110 psi (approx. 7.6 bar) tire pressure.



Figure 9 - Tested truck.

2.2 Instrumentation and calibration

Uniaxial strain gauges were placed on the main leaf spring of the 1st and 2nd steering axle (Figure 10) on the left hand side (LHS) and right hand side (RHS) of the vehicle.

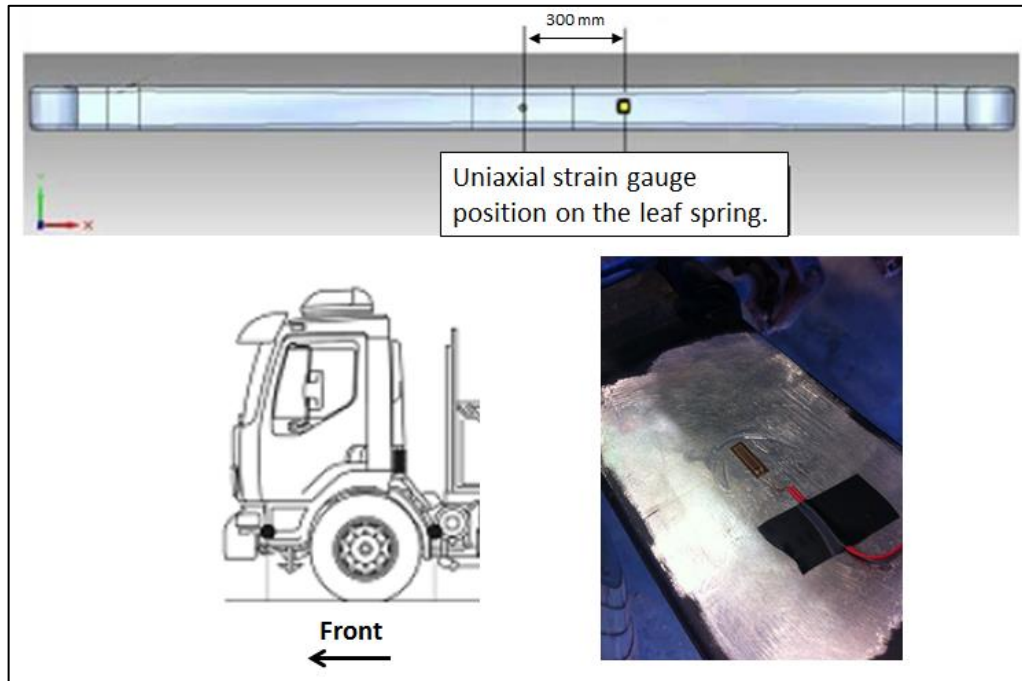


Figure 10 - Primary suspension leaf spring instrumentation.

The recorded values given by the mentioned instrumentation were in $\mu\epsilon$ (micro-strain). Therefore, calibration of the system was necessary to estimate the force applied on the pavement.

Utilizing known weights and a calibrated vehicle scale, calibration curves can be derived for applied load (in tons) versus $\mu\epsilon$. These curves can be applied using measurement equipment to record applied reaction load to the pavement (Figure 11 and Figure 12).



Figure 11 - Weighting scale used for the calibration.

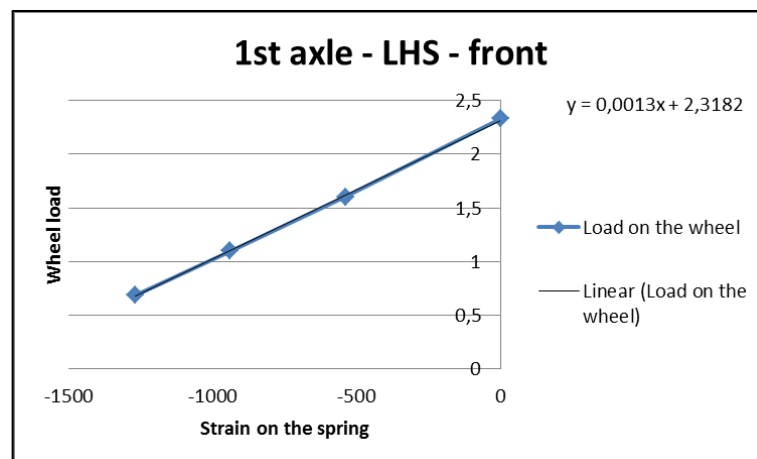


Figure 12 - Example of spring calibration.

Due to equivalent spring rates on the vehicle, all of the spring calibration curves have similar characteristics.

2.3 Accompanying signals

Other signals have been recorded in order to better correlate the data. The vehicle speed and distance were recorded through the vehicle CANBus (vehicle communication protocol which has general information of the vehicle); a GPS (global

positioning system) antenna and a camera recorder were placed on the vehicle as well.

All of the signals were recorded simultaneously on the data acquisition system. The IRI was correlated through GPS and vehicle distance data, and then added via post-processing.

Finally, Figure 13 represents the summarizing of the procedure from the instrumentation, data acquisition and data post-processing.

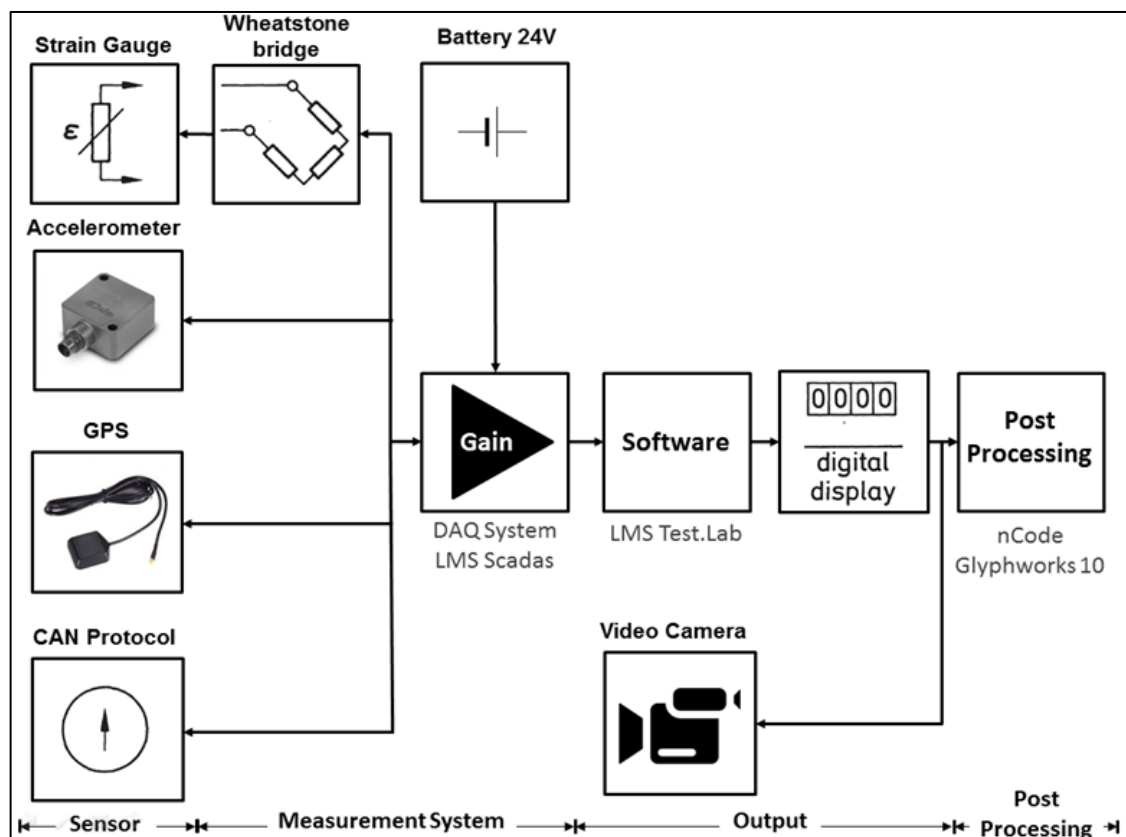


Figure 13 - Summary of instrumentation, data acquisition and data post-processing.

2.4 Measurements

The measurements were performed on a public highway in the state of Paraná (Brazil), which had a known value of IRI (International Roughness Index) that varied from 1.73 to 4.94 mm/m, with a track length of 122 km [13].

For specific events, such as emergency braking and lane changes, a closed course proving ground was used to minimize safety issues.

3. Results and Discussion

The variation of IRI indicates that the pavement used during the course of the measurements had a good or reasonable maintenance condition, according to the correlation table presented by Sayers, Gillespie and Paterson [14]. Therefore, the vertical dynamic loads were expected to be similar to the vertical static load – 3 tons per wheel – due to the lack of inputs from the pavement. However, by analyzing Figure 14, it is possible to identify loads higher than 3 tons along the measured track.

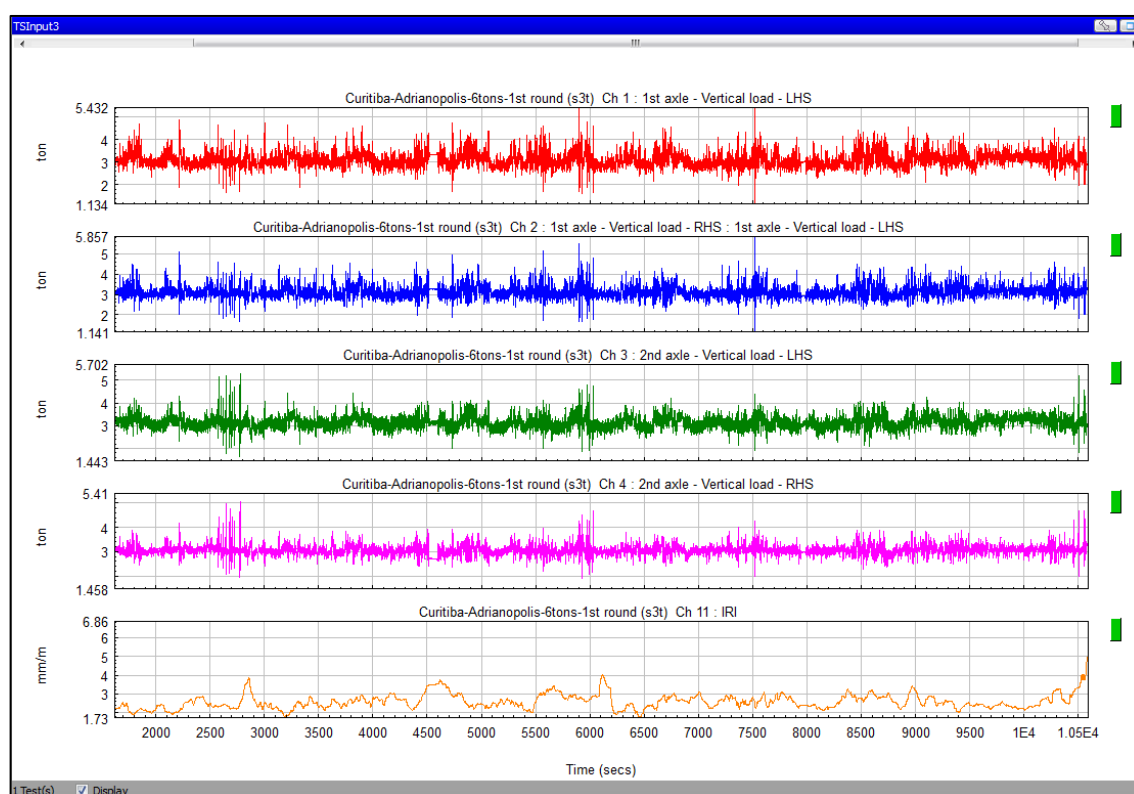


Figure 14 - Time signal - Vertical load - 4 measured points and IRI.

3.1 Speed bump events

Besides the fact that the vehicle passed over speed bumps with low speed (approx. 20 km/h) high load peaks were generated mainly during the contact with the edge of this event – Figure 15. Overload is more severe on the 2nd steer axle.

Furthermore, it was also clear, during braking, that load distribution is transferred to the front axles, causing an overload to the pavement before the speed bump – Figure 15.

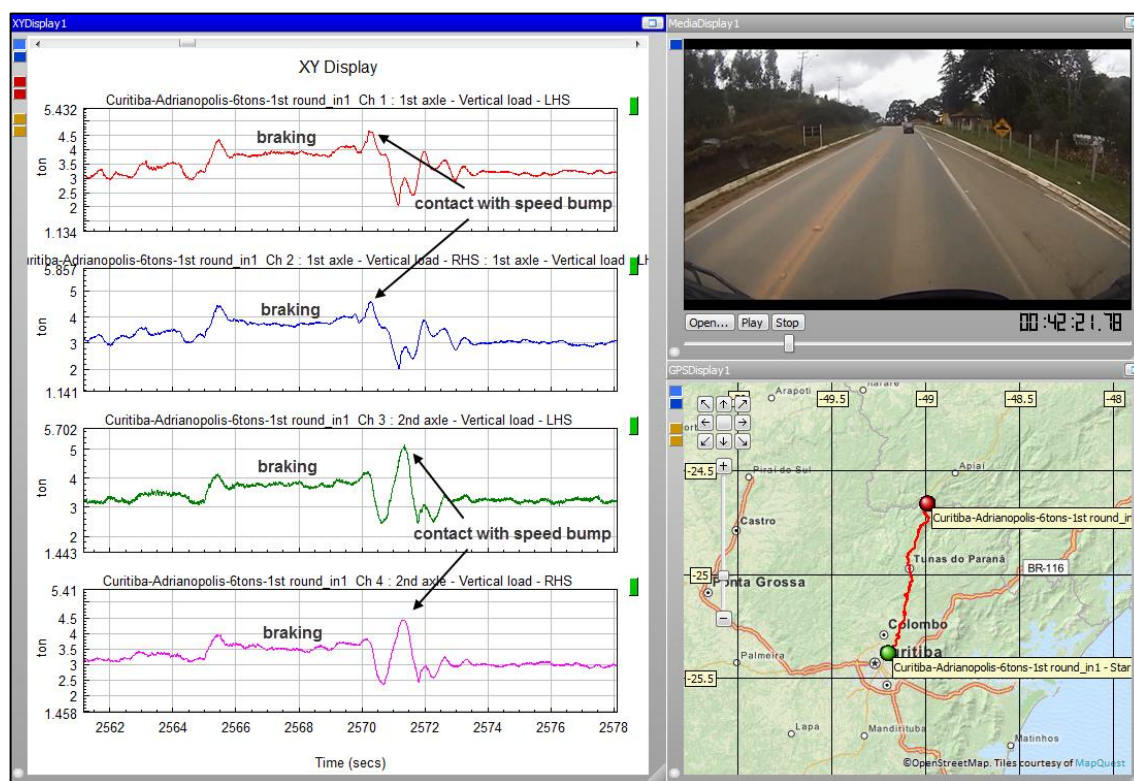


Figure 15 - Vertical load during speed bump event.

The load transfer during emergency braking was also taken in to account (70 to 0 km/h). The vertical load transferred to the pavement could cause an overload of 87% and 60% on the first and second steering axles respectively in comparison to the static load – Figure 16.

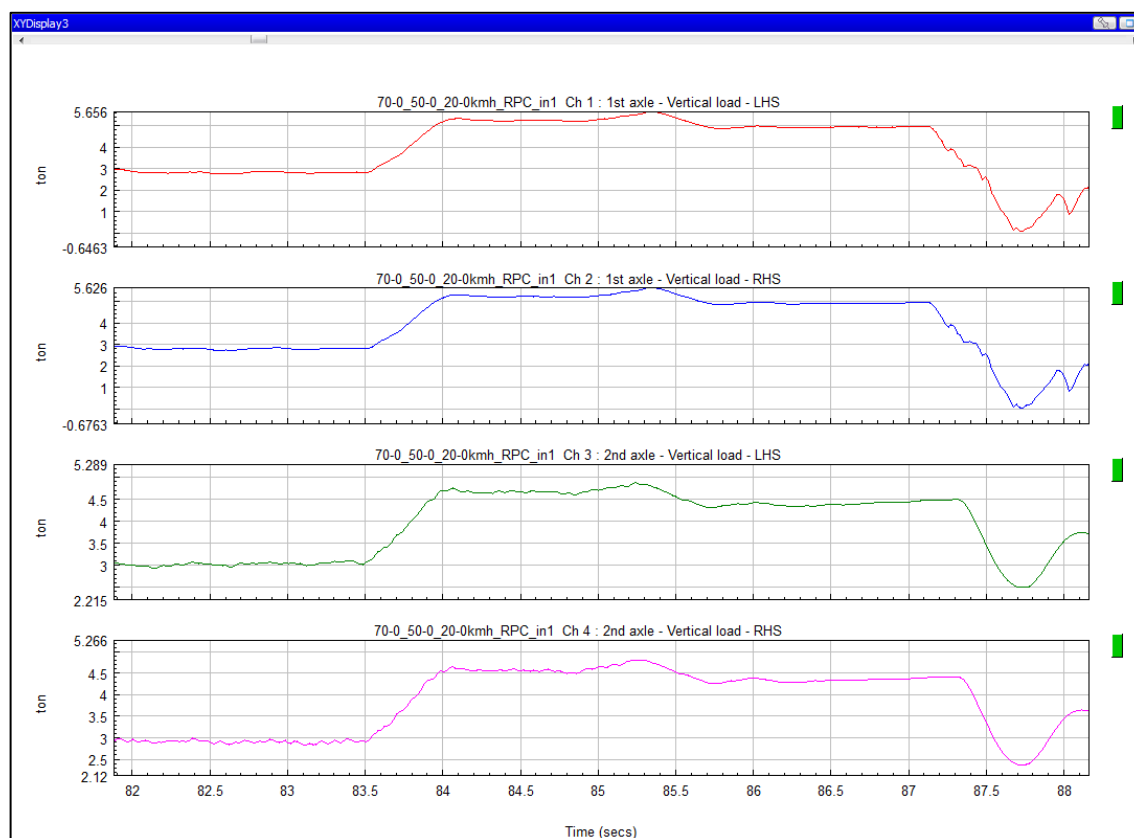


Figure 16 - Vertical load profile during emergency braking - 70 to 0 km/h.

3.2 Cornering events

Similar load transfer can also be observed during cornering maneuvers, but transversely on the truck. This phenomenon is represented even at low speed – Figure 17, as well as lane change events at 50 km/h – Figure 18.

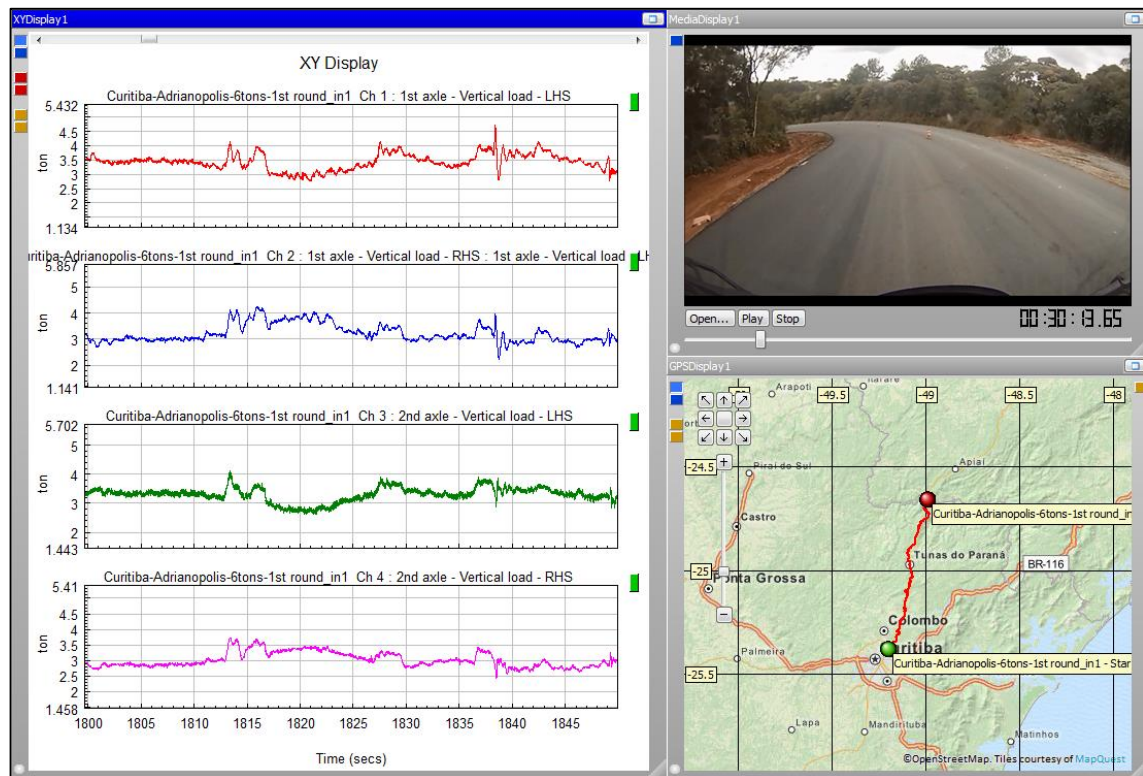


Figure 17 - Load transfer LHS to RHS of the truck.

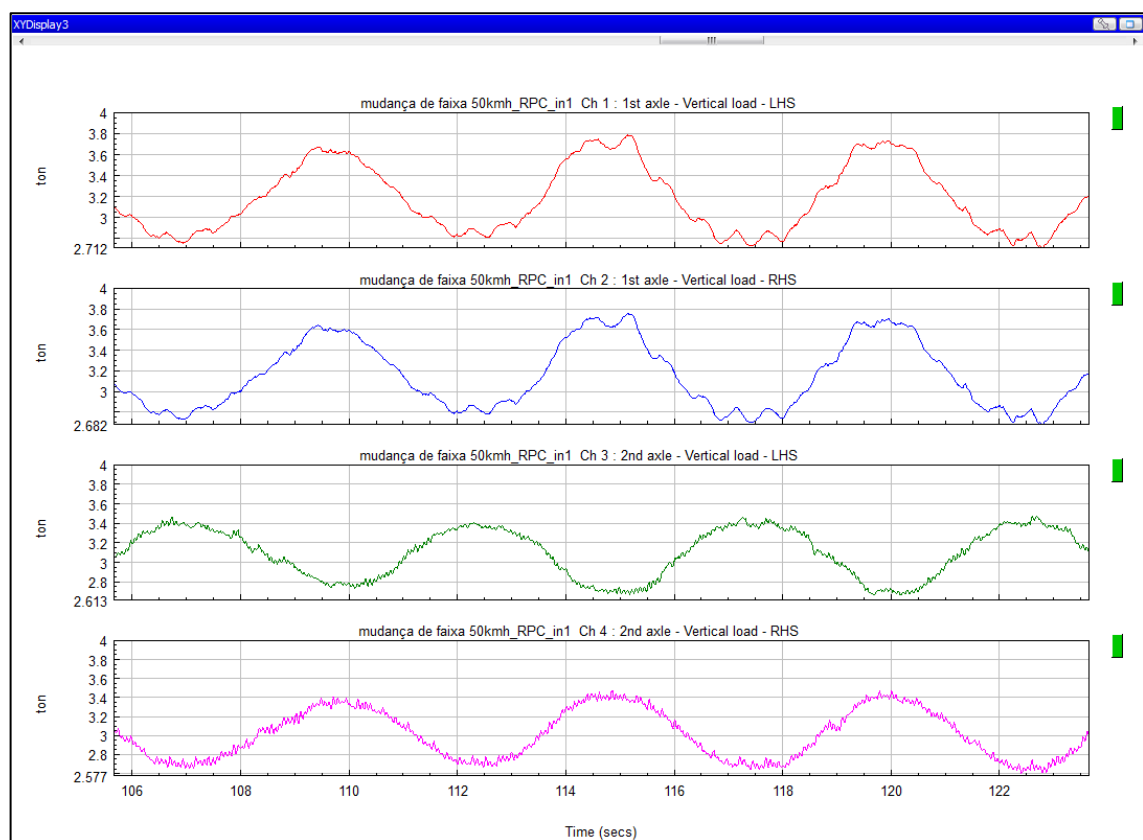


Figure 18 - Vertical load profile during lane change - 50 km/h.

3.3 Pothole events

Figure 19 presents the vertical load applied to the pavement on the pothole event, the depth of the analyzed hole was 50 mm. The overload condition reached 63% on the first steering axle and 47% on the second steering axle, when compared to its static value. Therefore, it is important to highlight that before the peak value was attained the vehicle approached zero contact with the ground. The near zero contact condition justifies the vertical load values approaching zero.

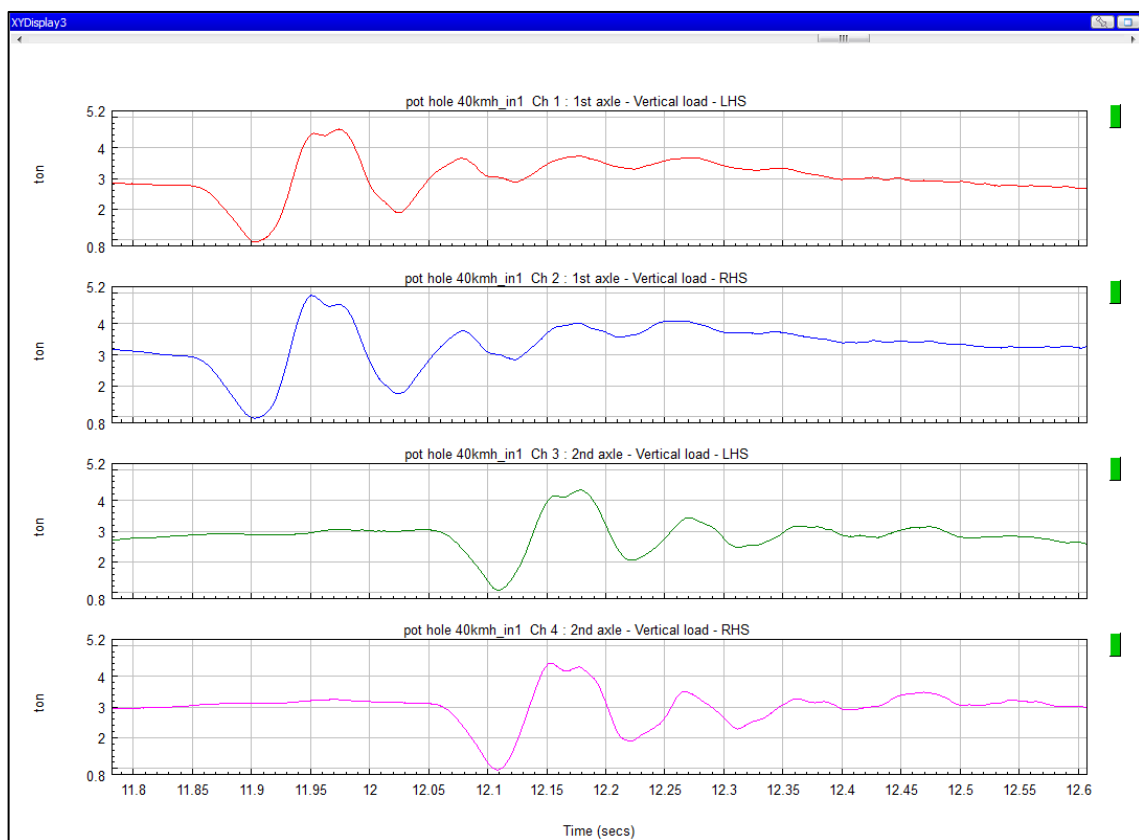


Figure 19 - Vertical load profile over a pot hole of 50mm depth - 40 km/h.

4. Conclusions

By analyzing the results, a conclusion can be recommended that the suggested methodology has good potential to record the derived vertical dynamic load applied to the pavement. This method provides a simple method of instrumentation, as well as a non-complex data processing procedure.

The methodology seems to be robust in both low frequency (lane changes, braking, speed bumps) and high frequency (pot holes and other longitudinal pavement roughness even with low IRI) events.

The presented results show, as expected, pavement overload on pot holes. A secondary discovery was the effect of the speed bump and braking maneuvers that generated similar overload conditions to the pavement. Furthermore, based on the specified truck type (8x2 rigid), the overload condition is more sensitive on the first steering axle for cornering, lane change and braking. Contrarily, the second steering axle will apply higher load conditions during the speed bump.

The main objective of this paper was to present a methodology to quantify the vertical load applied to the pavement based on a real application; therefore the idea was to vary the conditions more than analyze a specific event. This provides a way for future research to apply the same methodology and vary parameters such as lateral acceleration during cornering events, longitudinal acceleration during braking events, and different vehicle speeds over defined pot holes. In this way future researchers would be able to characterize a trend of the real overload applied to the pavement.

Finally, vertical load, more specifically vertical overload, acts on the surface layer (the most critical layer on flexible pavements) and, therefore decreases the lifetime of the pavement. This conclusion maybe a common sense, but the proposed methodology could quantify the real applied vertical loads to have more reliable data for pavement management system, as well as better inputs for simulation.

References

1. Pircher, M. et al. 2011. "Damage due to heavy traffic on three RC road bridges". Engineering Structures. 33 (12): 3755-3761.
2. Yang, Y. S, et al. 2009. "Binzhou perpetual test road: dynamic response of pavement under very heavy loads". Road Materials and Pavement Design. 10 (1): 151-165.
3. Ferreira, H. T. 2003. "Determinação das frequências naturais e modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em MatLab-Simulink (Determination of natural frequencies and vibration modes of a vehicle with two axles using MatLab-Simulink)". M. Eng. Thesis, University of Sao Carlos. (in Portuguese).
4. Lu, Y. 2010 et al. 2010. "Numerical and experimental investigation on stochastic dynamic load of a heavy duty vehicle". Applied Mathematical Modeling. 34 (10): 2698-2710.
5. Liu, C. and Wang, Z. 2008. "Influence of joints on ride quality and roughness index". Road Materials and Pavement Design. 9 (1): 111-121.
6. Wang H. and Al-Qadi, I. L. 2010. "Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking". Road Materials and Pavement Design. 11 (1): 101-121.
7. Gillespie, T. D. 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers.
8. Jazar, R. N. 2009. Vehicle Dynamics: Theory and Application. 3rd ed., New York: Springer.
9. Causemann, P. 2000. Automotive Shock Absorbers: features, designs and applications. 1st ed., Berlin: Sachs.

10. Hoffmann, K. 2012. An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. Pfungstadt: HBM.
11. Hannah, R. L. and Reed, S. E. 1992. Strain Gage Users' Handbook. London: Chapman & Hall, 1992.
12. Doebelin, E. 1990. Measurement System: application and design. 4th ed., New York: McGraw-Hill.
13. DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (Brazilian Department of Transportation Infrastructure) 2013. Projetos Básicos e Executivo de Engenharia para Restauração, Manutenção e Conservação de Rodovia.
14. Sayers, M. W.; Gillespie, T. D.; Paterson, W. D. O. 1986. Guideline for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. Washington D. C: World Bank Banco Mundial.

ANEXO 3

Artigo: *“Quantification of the vertical load applied to the pavement during cornering maneuver of a commercial vehicle”*, submetido e aprovado pelo *International Journal of Pavements*.

Kubo Pablo**From:** PERMISSIONS <permissions@asce.org>**Sent:** segunda-feira, 4 de janeiro de 2016 12:30**To:** Kubo Pablo**Subject:** RE: Query %Journal of Transportation Engineering% %TEENG-3511% - [EMID:e5094d406baa394f]

Dear Pablo Kubo:

Permission is granted to reuse your paper "Quantification of the vertical load applied to the pavement during braking maneuver of a commercial vehicle" in your Thesis, under the condition that the paper makes up less than 25% of your new work. A full credit line must be added to the material being reprinted. For reuse in non-ASCE publications, add the words "With permission from ASCE" to your source citation. For Intranet posting, add the following additional notice:

"This material may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the American Society of Civil Engineers."

Regards,

Joann

Joann Fogleson

Manager, Product and Subscription Services

American Society of Civil Engineers

1801 Alexander Bell Drive

Reston, VA 20191

PERMISSIONS@asce.org

703-295-6112

E-mail: jfogleson@asce.orgInternet: www.asce.org/pubs | www.ascelibrary.org | <http://ascelibrary.org/page/rightsrequests>

A full credit line must be added to the material being reprinted. For reuse in non-ASCE publications, add the words "With permission from ASCE" to your source citation. For Intranet posting, add the following additional notice: "This material may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the American Society of Civil Engineers."

Each license is unique, covering only the terms and conditions specified in it. Even if you have obtained a license for certain ASCE copyrighted content, you will need to obtain another license if you plan to reuse that content outside the terms of the existing license. For example: If you already have a license to reuse a figure in a journal, you still need a new license to use the same figure in a magazine. You need separate license for each edition

From: Kubo Pablo [<mailto:pablo.kubo@volvo.com>]**Sent:** Tuesday, December 29, 2015 5:59 AM**To:** PERMISSIONS**Subject:** FW: Query %Journal of Transportation Engineering% %TEENG-3511% - [EMID:e5094d406baa394f]**Importance:** High

Dear Joann Fogelson,

I've got approval on an article ("Quantification of the vertical load applied to the pavement during braking maneuver of a commercial vehicle") on the Journal of Transportation Engineering. This text is part of my 2nd Ph.D. thesis. I would like to print the final Thesis text with this paper as an appendix, therefore if possible I would like to have a formal authorization from its journal to do that.

Best regards.

Pablo Kubo.

QUANTIFICATION OF THE VERTICAL LOAD APPLIED TO THE PAVEMENT DURING CORNERING MANEUVER OF A COMMERCIAL VEHICLE

Pablo Kubo *

Ph.D. in Mechanical Engineering and Ph.D. Candidate in Civil Engineering (State University of Campinas)

* Address: Rua João Dembinski, 371 casa 40, Curitiba, PR, 81270-330 pyykubo@hotmail.com

Cassio Paiva

Professor of Civil Engineering, State University of Campinas, Campinas, Brasil

Arthur Larocca

Mechanical Engineer, Alpha Serviços de Assessoria Técnica Ltda, Curitiba, Brasil

Joshua Dawson

Mechanical Engineer, Volvo Trucks North America, Greensboro, USA

ABSTRACT: The wheel loads of heavy trucks are the major source of pavement damage, given the repeated loadings imposed by them due to transient events and surface irregularities. While related studies focus on steady-state context regarding simplified vehicle's parameters and ideal pavement conditions, this paper aims to analyze the vertical load applied to the pavement by considering cornering maneuver as a transient event. In this concern, measurements were performed on a rigid truck, with two steering front axles, in a closed course proving ground located in Caxias do Sul city (Brazil). It has been presented the relationship between vehicle's speed, lateral acceleration and transferred vertical load for a given curve radius of 85.6 m and 3.7° of transversal slope. The measurements results indicated that for every 10 km/h increasing on the vehicle's speed, additional 110 kgf will be transferred to the pavement on the outer side of the cornering radius. This value itself could not be considered high, but it will be also added to the static load, or overload in some truck applications.

KEY WORDS: Vertical load, lateral acceleration, vehicle speed, truck, cornering, pavement.

1. INTRODUCTION

Besides impacting directly on the vehicle behavior (rolling resistance, ride & handling, fuel economy, NVH), the tire-road interaction is also a factor that compromises the pavement integrity. As larger loads and vehicles appear in the road transportation system, pavement damage concerns are becoming an increasingly relevant issue in road construction and maintenance activities [1, 2].

Wu, Liang and Adhikari [3] emphasizes that, static uniform load is most commonly used on pavement structure for the mechanical analysis and calculation, which is reasonable for conditions such as low speed and small amount of loads.

According to Taheri, Obrien and Collop [4], the traditional approach of pavement life assessment consider all axle weights and calculates the number of equivalent axles of standard weight (8.2 tons). Those Authors add that it does not explicitly calculate / quantify the local effect of dynamic oscillation of axle forces about static weight.

In the vehicle perspective, some maneuvers would direct affect the load applied to the pavement, such as rolling.

According to Gillespie [5], the mechanics of the roll moment applied to an axle are shown in Figure 1 and characterized by Equation 1.

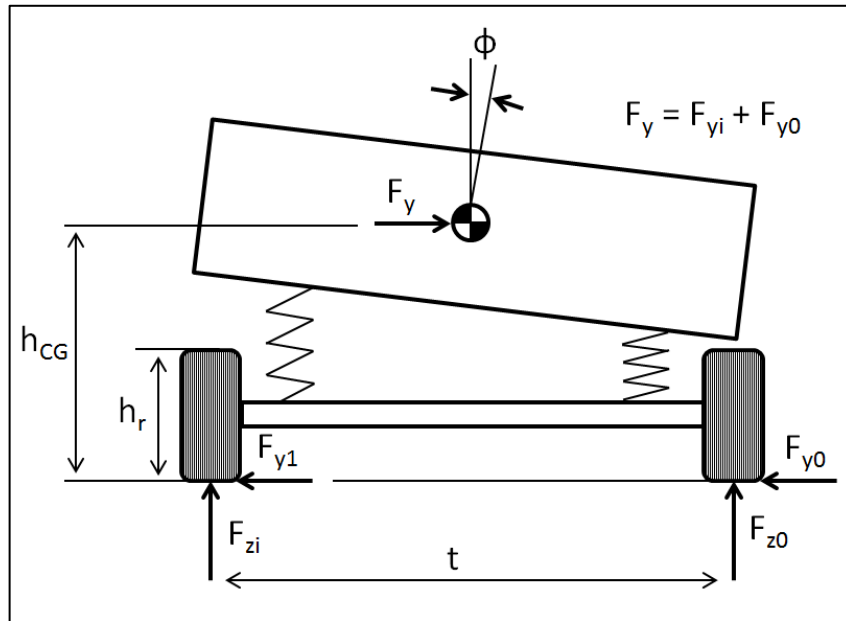


Figure 1. Forces analysis of a simple vehicle in cornering
Source: Adapted from Gillespie [5]

$$FZ0 - FZi = 2 \times Fy \times hr/t + 2 K\phi \times \phi/t = 2 \times \Delta FZ \quad (1)$$

Where:

FZ0: load on the outside wheel in the turn

FZi: load on the inside wheel in the turn

Fy: lateral force

hr: roll center height

t: track width

$K\phi$: roll stiffness of the suspension

ϕ : roll angle of the body

In summary Gillespie [5] states that the difference between the vertical load from the outside / inside wheels will be equal to the sum of the lateral load transfer due to cornering forces and the lateral load transfer due to vehicle roll.

In this way, the objective of this paper is to quantify the load transfer during cornering events on a flexible pavement.

Finally it is important to emphasize that the current pavement design methods applied in Brazil do not consider the differences on geometric parameters, such as corners.

2. METHODOLOGY

2.1 Vehicle instrumentation

An 8x2 rigid truck (2 steering front axles, 1 drive axle and 1 tag axle – Figure 2) with the following specifications has been used for the measurements: 6 tons per axle on the front suspension; 295/80 R22.5 tire size and 110 psi (approx. 7.6 bar) of tire pressure.



Figure 2. 8x2 rigid truck used for the measurement

Uniaxial strain gauges with a full bridge setup were placed on the main leaf spring of the 1st and 2nd steering axles, on both left hand side (LHS) and right hand side (RHS) of the vehicle, as illustrated in Figure 3.

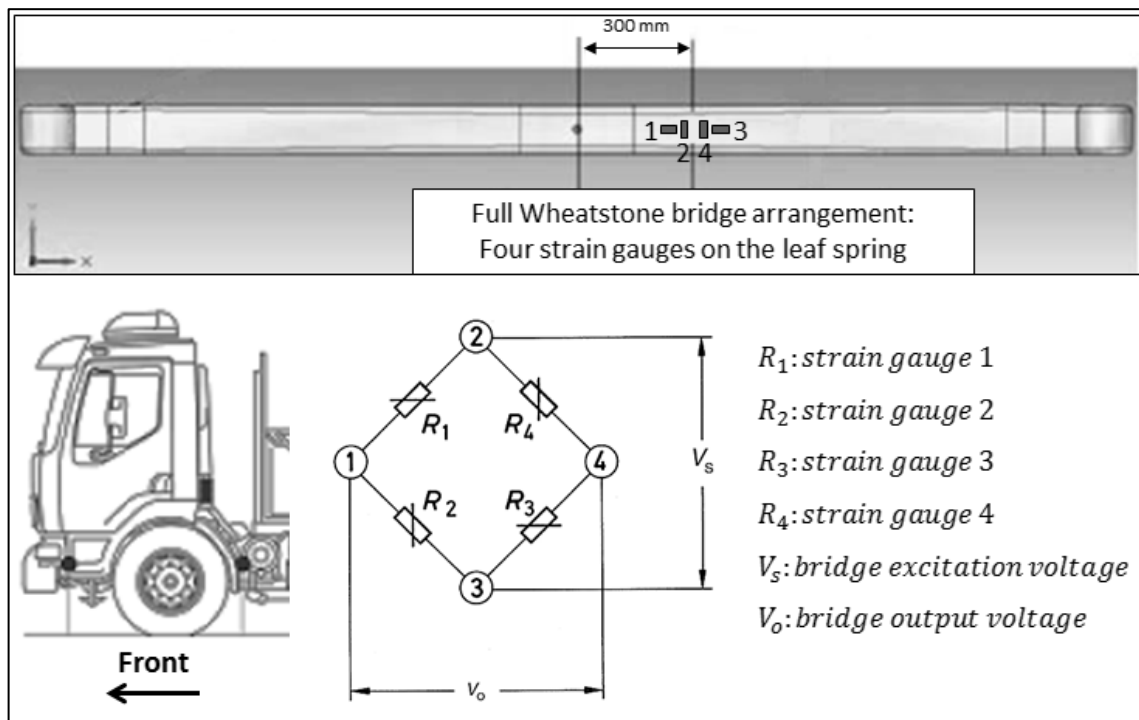
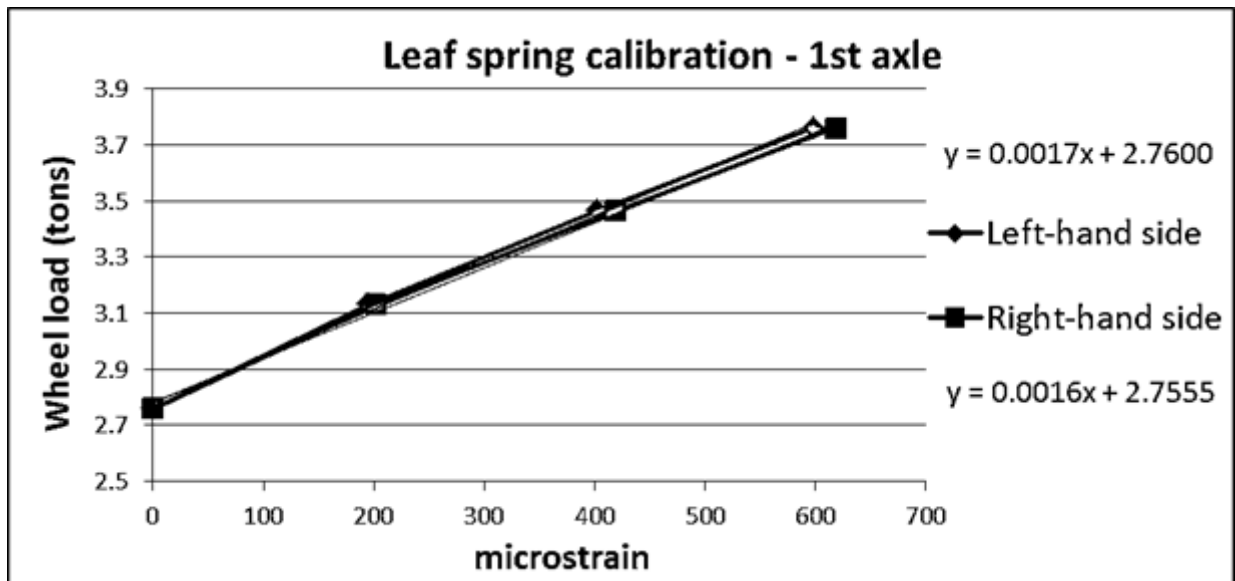
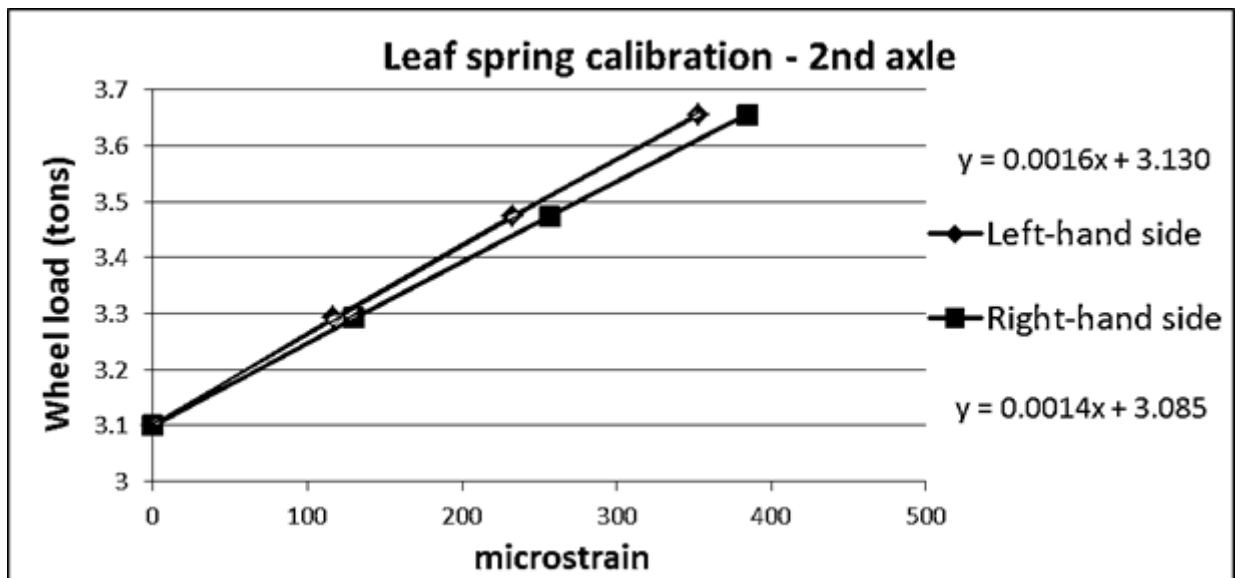


Figure 3. Illustration of the strain gauge instrumentation on the leaf spring

The recorded values given by afore mentioned instrumentation were in $\mu\epsilon$ (micro-strain). Therefore, calibration of the system was necessary to estimate the force applied to the pavement.

Utilizing known weights and a calibrated vehicle scale, calibration curves can be derived for applied load (in tons) versus $\mu\epsilon$ (in other words, each leaf spring is used as a load cell). The coefficients of these calibration curves (Figure 4 and 5) are used during the data post-processing, in order to convert the measured values, microstrain ($\mu\epsilon$), to applied load (tons) to the pavement contact patch.

Figure 4. Calibration of 1st axle springsFigure 5. Calibration of 2nd axle springs

In addition to the strain gauge instrumentation, an accelerometer was installed on the front axle of the test truck in order to quantify the vehicle lateral acceleration during the cornering maneuver. Figure 6 illustrates the complete instrumentation, data acquisition and post-processing steps.

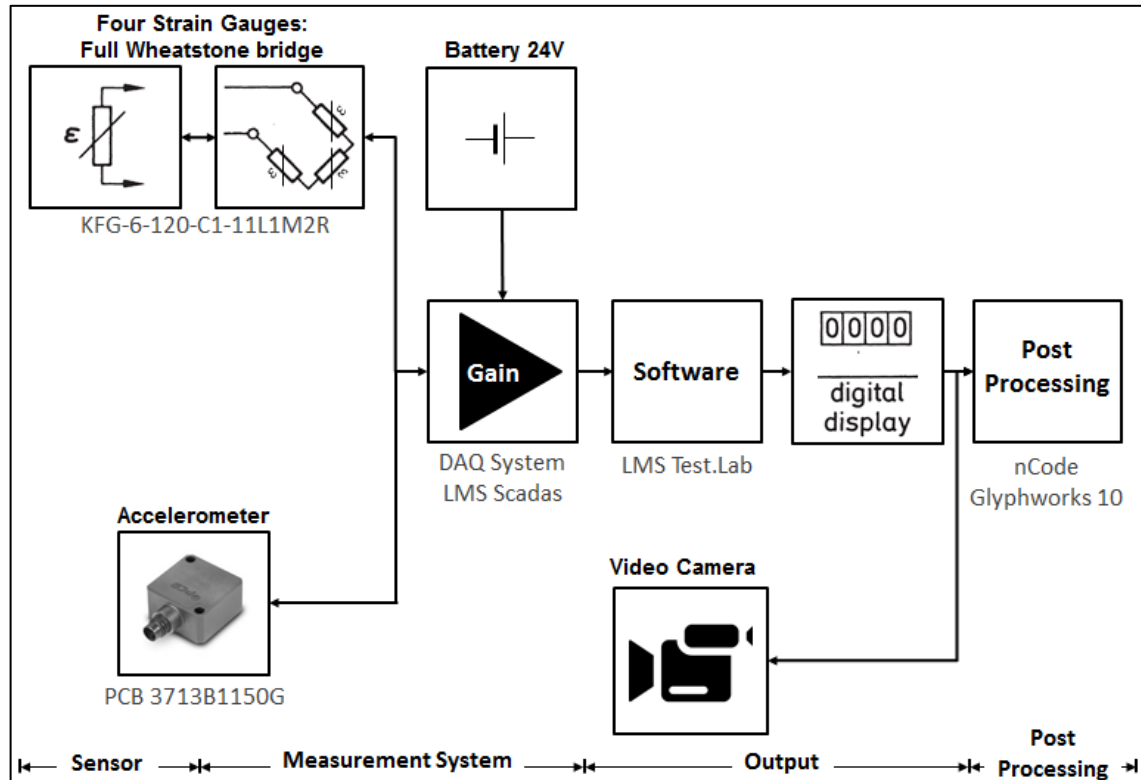


Figure 6. Summary of instrumentation, data acquisition and data post-processing

2.2 Measurements

Measurements were performed at a closed course proving ground in Caxias do Sul city (Brazil), in order to minimize safety issues.

The vehicle speed, during cornering was set according up to safety margin, in order to avoid accidents (70 km/h).

For each vehicle speed (30, 40, 50, 60 and 70 km/h) the measurements were repeated three times. All measurements were performed on the same day to minimize the risk of variation of the adhesion coefficient of the test track ($\mu = 0.8$). Also, it is important to highlight that the curve radius was 85.6 m and 3.7° of transversal slope.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 presents the collected data from the performed measurements, in terms of vertical load applied to the pavement, and lateral acceleration, by considering static values and the variation of the vehicle's speed.

Table 1. Results summary

Vehicle speed (km/h)	1st axle (ton)		2nd axle (ton)		acceleration (g)
	1st axle LHS	1st axle RHS	2nd axle LHS	2nd axle RHS	
Static	2.76	2.755	3.13	3.085	-
30	2.827	2.76	3.145	3.064	0.01
	2.841	2.749	3.161	3.051	0.02
	2.846	2.743	3.167	3.045	0.02
average	2.84	2.75	3.16	3.05	0.02
40	2.934	2.652	3.233	2.933	0.08
	2.923	2.662	3.231	2.945	0.07
	2.925	2.657	3.227	2.941	0.07
average	2.93	2.66	3.23	2.94	0.07
50	3.127	2.509	3.446	2.8	0.16
	3.132	2.497	3.461	2.789	0.17
	3.132	2.494	3.46	2.786	0.16
average	3.13	2.50	3.46	2.79	0.16
60	3.318	2.368	3.577	2.577	0.26
	3.335	2.36	3.592	2.57	0.26
	3.33	2.353	3.592	2.566	0.26
average	3.33	2.36	3.59	2.57	0.26
70	3.489	2.24	3.77	2.425	0.33
	3.483	2.24	3.761	2.424	0.33
	3.508	2.194	3.793	2.377	0.35
average	3.49	2.22	3.77	2.41	0.34

As mentioned before, for safety issues, the maximum vehicle speed was 70 km/h, which generated lateral acceleration of 0.34 g, but virtual analysis with similar vehicle specification [6] suggested lateral acceleration of 0.7 g before vehicle rollover.

In this way, it is possible to plot the vertical load applied to the pavement with the vehicle speed – Figure 7.

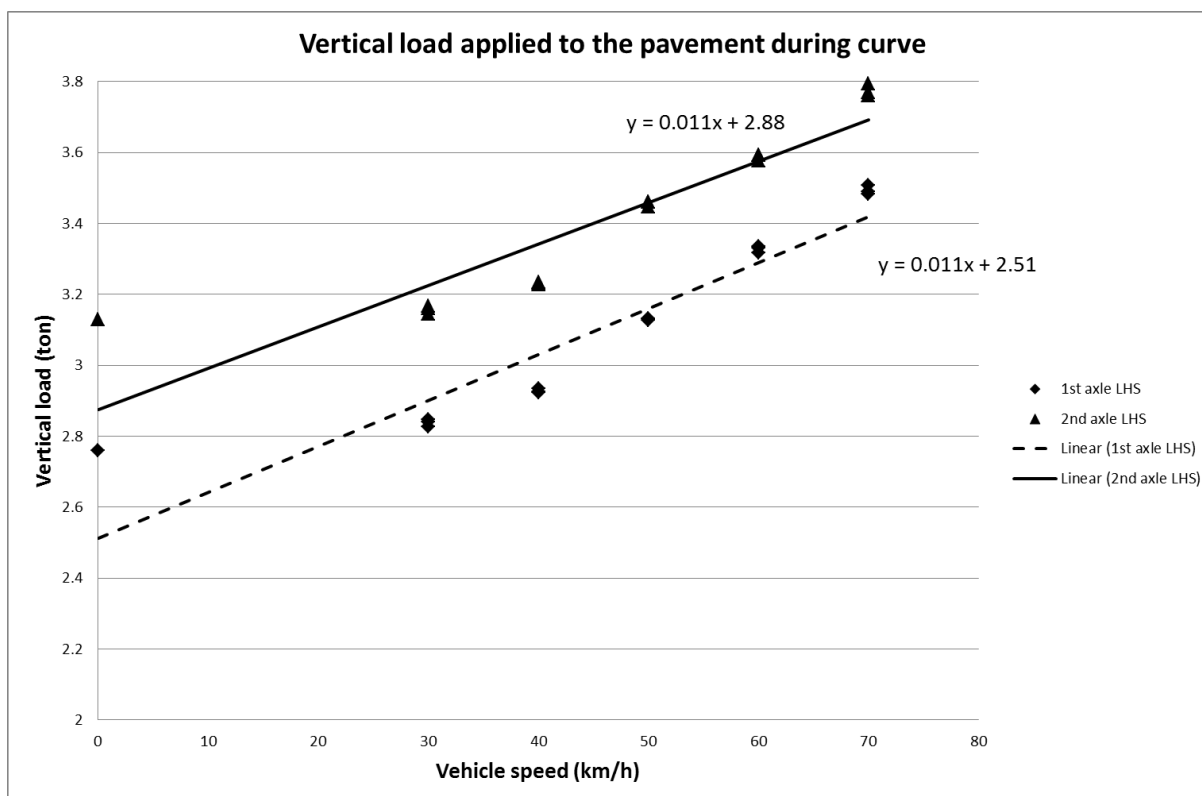


Figure 7. Vehicle load applied to the pavement vs Vehicle speed.

By analyzing Figure 7, it is possible to realize that the slope of the curves are the same ($y = 0.011x$), the only difference is the static load – 2.88 tons on the 1st axle LHS and 2.51 tons on the 2nd axle LHS – it is important to highlight that the cornering was done only to the right.

In summary, the vertical load applied to the pavement could be translated by the Equation 2.

$$\text{Vertical load during cornering} = 0.011 \times \text{vehicle speed} + \text{static load} \quad (2)$$

4. CONCLUSIONS

During high speed curve, it is possible to predict the load applied to the pavement with the equation (2). For a given center of gravity, the trend lines are added to the static load.

The measurements results indicated that for every 10 km/h increasing on the vehicle's speed, additional 110 kgf will be transferred to the pavement on the outer side of the cornering radius. This value itself could not be considered high, but it will be also added to the static load, or overload in some truck applications.

If it is considered a vehicle traveling at 70 km/h with a static load of 6 tons on the front axle (maximum allowed load for front axle by Brazilian legislation), it will apply 25% more load to the pavement, if compared to the static load – if considered the tolerance of 7.5% of the Brazilian legislation, this value will increase to 33%.

Despite the fact that the hypothesis is that the load transfer is related to the lateral acceleration of the vehicle, for future studies, it is recommended to repeat the same procedure on curves with different radius and slopes. However, this paper could start a discussion regarding the necessity to consider a different design method for corners.

REFERENCES:

- [1] Gallegos, M., et al. Evaluation of Contact Force and Pressure of Heavy Vehicle's Supersingle Tire versus Dual Tires. SAE Technical Paper 2010-01-1900, Society of Automotive Engineers, 2010. doi: 10.4271/2010-01-1900.
- [2] Oliveira, A., et al. Tire pressure impact on structural durability test results. SAE Technical Paper 2008-36-0041, Society of Automotive Engineers, 2008. doi: 10.4271/2008-36-0041.
- [3] Wu, J., Liang, J. and Adhikari, S.. Dynamic Response of Concrete Pavement Structure with Asphalt isolating Layer under Moving Loads. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 1 (6), 439-447
- [4] Taheri, A., Obrien, E. J. and Collop, A. C.. Pavement damage model incorporating vehicle dynamics and a 3D pavement surface. International Journal of Pavement Engineering, 2012, 13 (4), 374-383.
- [5] Gillespie, T.. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA, 1992.
- [6] Lima, V. A.; Garbin, L. And Santos Neto, C. R. Lateral dynamics simulation of a truck with modified rear suspension. SAE Technical Paper 2012-36-0020, Society of Automotive Engineers, 2008.

ANEXO 4

Artigo: *“Quantification of the vertical load applied to the pavement during braking maneuver of a commercial vehicle”*, submetido ao *Journal of Transportation Engineering*, em 10/09/2015.

Quantification of the vertical load applied to the pavement during braking maneuver of a commercial vehicle.

Pablo Kubo, Ph.D.¹⁺, Cassio Paiva, Ph.D.², Arthur Larocca³ and Joshua Dawson⁴

¹Department of Civil Engineering, University of Campinas, Campinas 13083-852, Brazil

²Department of Civil Engineering, University of Campinas, Campinas 13083-852, Brazil

³Department of Engineering, Alpha Technical Services, Curitiba 80520-590, Brazil

⁴Chassis and Vehicle Dynamic Engineering, Volvo Group North America, Greensboro NC 27409, United States of America

⁺Corresponding Author: E-mail: pyykubo@hotmail.com, Telephone: +55 41 9274-7661

Abstract: Front and rear axle braking performance in a vehicle is a well documented subject in reference to longitudinal forces, but this statement is not valid for vertical forces. In order to analyze this behavior, a commercial vehicle (equipped with Anti-Lock Breaking System) was instrumented with strain gauges and one accelerometer for testing in a closed course proving ground located in Brazil. By using the vehicle's springs as load cells, the vertical load applied to the pavement was evaluated during different braking maneuvers. Using a bi-directional analysis of variance (ANOVA) and a post-hoc Tukey's HSD (Honest Significant Differences) test, statistical differences of the transferred load were evaluated between the vehicle's initial speed and brake pedal position. Although it is recommended to repeat the same procedure on different vehicles and varying pavements surfaces, the results indicate that, unlike the brake pedal position, the vehicle's initial speed does not influence in the vertical load applied to the pavement during braking maneuver.

Introduction

Wu, Liang and Adhikari (2014) emphasize that static uniform load is most commonly used on pavement structure for the mechanical analysis and calculation, which is reasonable for conditions such as low speed and small amounts of load.

According to Taheri, Obrien and Collop (2012), the traditional approach of pavement life assessment considers all axle weights and calculates the number of equivalent axles of standard weight (8.2 tons). Those Authors add that it does not explicitly calculate the local effect of dynamic oscillation of axle forces about static weight.

Wang and Al-Qadi (2010) state that due to the viscoelastic nature of hot-mix asphalt (HMA), its behavior is dependent on both temperature and rate of loading. These Authors also indicate that some transient events, like braking at pavement intersections, impose additional surface tangential stress due to frictional forces on the pavement's surface.

Front and rear axle braking performance in a vehicle is a well documented subject in reference to longitudinal forces (X direction) regarding rolling resistance effects, bearing friction and driveline drag (Gillespie 1992; Kulakowski, Chi and Lin 1992; Heiging and Ersoy 2011; Mastinu and Ploechl 2014; Blundell and Harty 2015), but it does not have the same approach for vertical forces (Z direction).

The objective of this paper is to quantify the vertical load transfer during braking events on flexible pavement.

Methodology

An 8x2 rigid truck (2 steering front axles, 1 drive axle and 1 tag axle – Figure 1) with the following specifications has been used for the measurements: 6 tons per axle on

the front suspension; 295/80 R22.5 tire size and 110 psi (approx. 7.6 bar) of tire pressure, ABS equipped.



Figure 20 – 8x2 rigid truck used for the measurements.

Uniaxial strain gauges with a full bridge setup were placed on the main leaf springs of the 1st and 2nd steering axles, on both left hand side (LHS) and right hand side (RHS) of the vehicle, as illustrated in Figure 2.

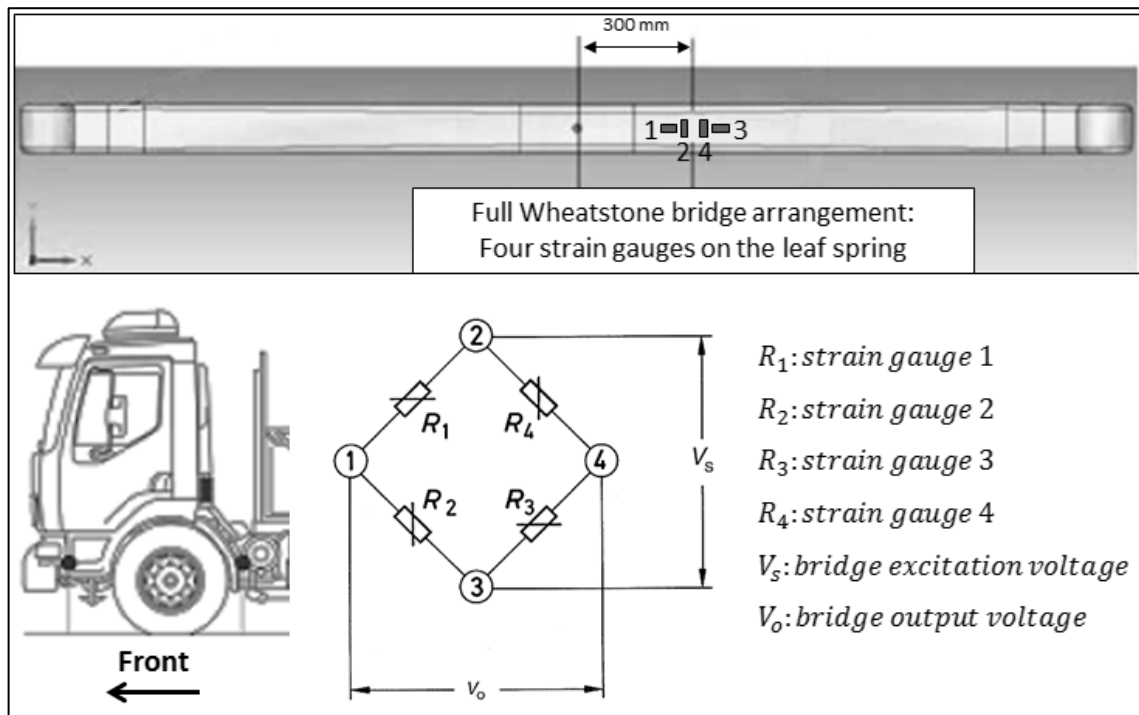


Figure 2 – Illustration of the strain gauge instrumentation on the leaf spring.

The recorded values, given by afore mentioned instrumentation, were in $\mu\epsilon$ (micro-strain). Therefore, calibration of the system was necessary to estimate the force applied to the pavement.

Utilizing known weights and a calibrated vehicle scale, calibration curves can be derived for applied load (in tons) versus $\mu\epsilon$ values (in other words, each leaf spring was used as a load cell). The coefficients of these calibration curves (Figure 3 and 4) are used during the data post-processing in order to convert the measured values, in microstrain ($\mu\epsilon$), to applied load (tons) to the pavement contact patch.

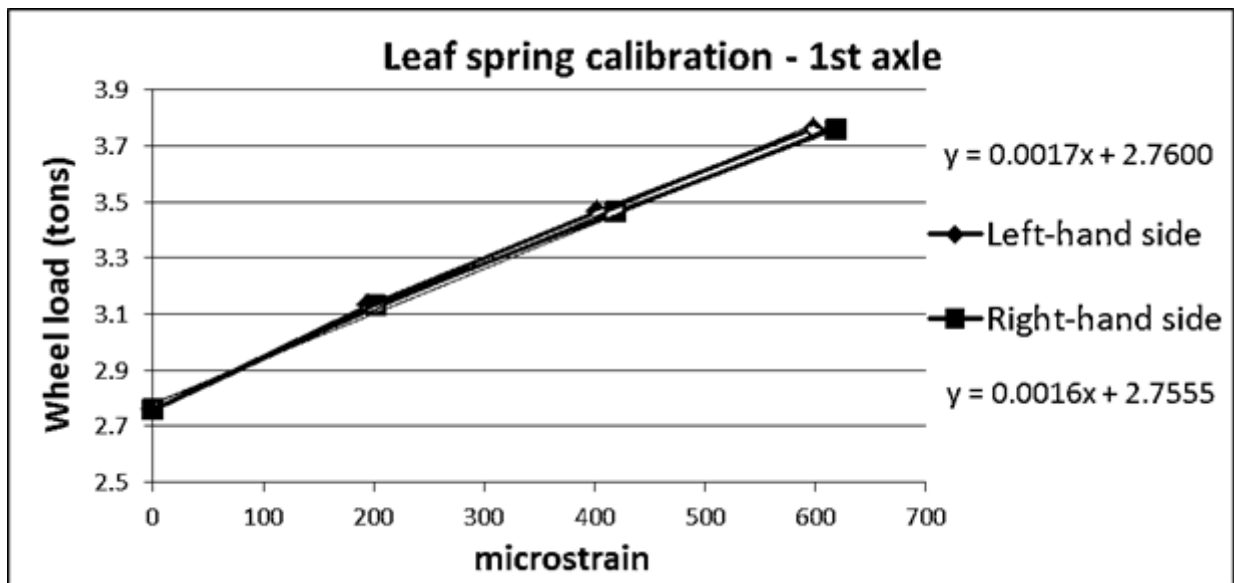


Figure 3 – Calibration of 1st axle's springs.

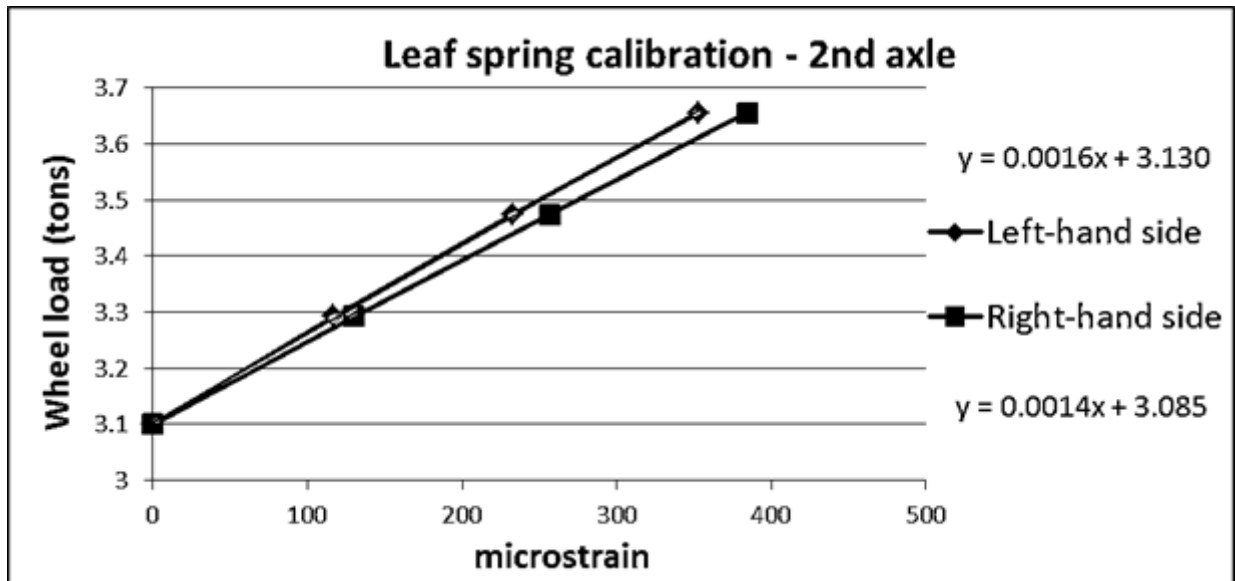


Figure 4 - Calibration of 2nd axle's springs.

In addition to the strain gauge instrumentation, an accelerometer was installed on the front axle of the test truck in order to quantify the vehicle deceleration during the braking maneuver. Figure 5 illustrates the complete instrumentation, data acquisition, and post-processing steps.

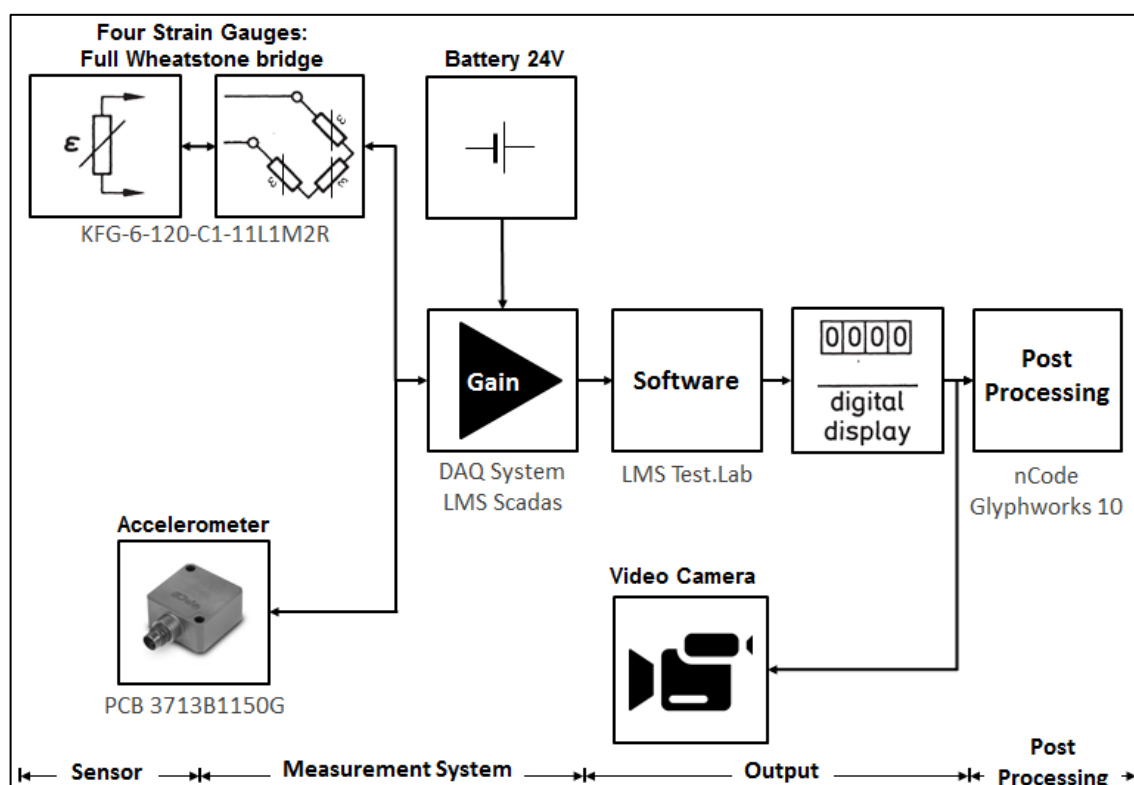


Figure 5 - Summary of instrumentation, data acquisition and post-processing.

Measurements

Measurements were performed at a closed course proving ground in the state of Rio Grande do Sul (Brazil), in order to minimize safety issues.

The vehicle's speed, during braking, was set according to ECE R13 (2012). The only variant, other than the vertical load applied to the pavement, was the brake pedal pressure applied.

For each of the vehicle's initial speed (20, 50 and 70 km/h), five different brake pedal travels (20, 40, 60, 80 and 100%) were tested. The measurement was repeated three times on each condition and the average values were used.

All measurements were performed on the same day to minimize the risk of variation of the test track's adhesion coefficient ($\mu = 0.8$).

Results

Despite the different test conditions, the observed results showed a similar behavior for all braking maneuvers. For instance, Figure 6 presents the behavior of vertical load and deceleration on the first axle based on a 70-0 km/h braking with full brake pedal applied.

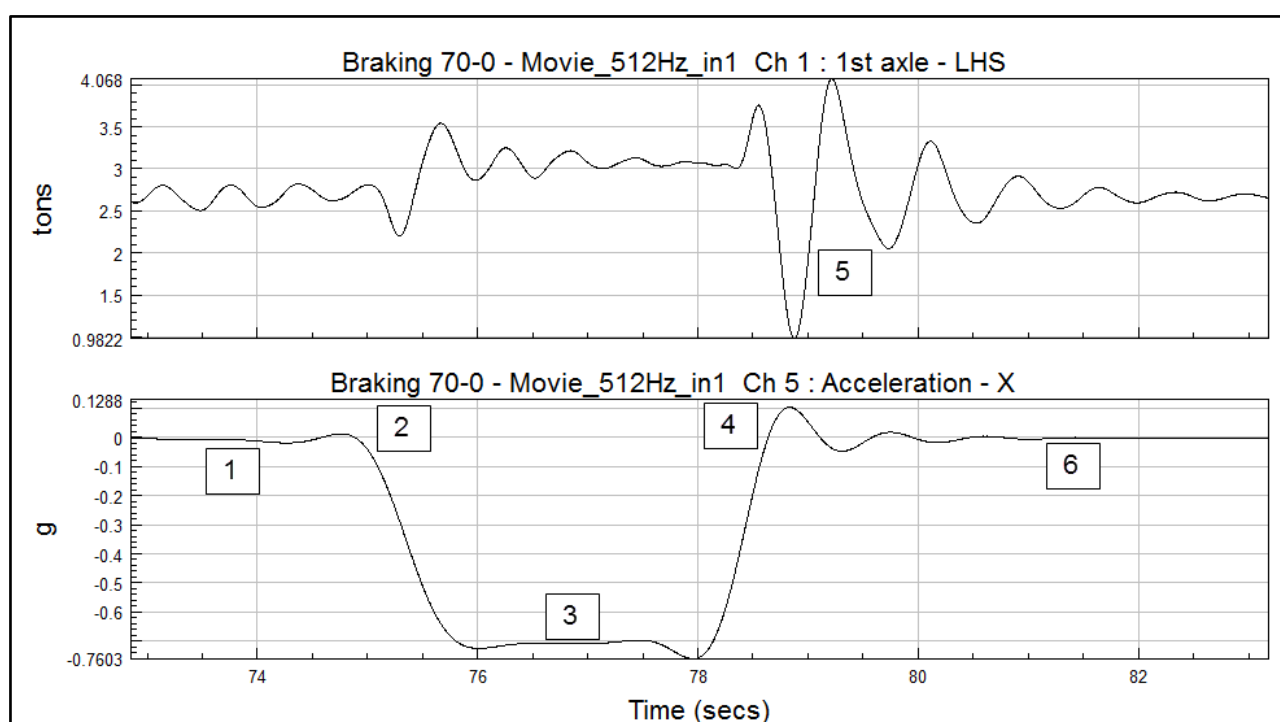


Figure 6 - Front suspension behavior during braking.

- 1: constant speed (70 km/h);
- 2: brake pedal applied (100 %);
- 3: constant deceleration in X direction – brake pedal applied at a constant percentage;
- 4: vehicle stops (0 km/h);
- 5: bounce movements, due to vehicle's suspension oscillation;
- 6: vehicle on steady state.

It can be shown, that the bounce movements (5) on the vehicle's imminent stop are responsible for the vertical peak load applied to the pavement. Considering the fatigue mechanism and cycle counting, this peak load is expected to be more relevant than the uniform load transferred during the constant brake deceleration (3). In this regard, these peak's values were extracted from each measured condition and analyzed separately.

Figure 7 summarizes the obtained results (average) for the vertical peak load on the front axle during different braking maneuvers, different vehicle initial speed, and different brake pedal position in comparison to the static load.

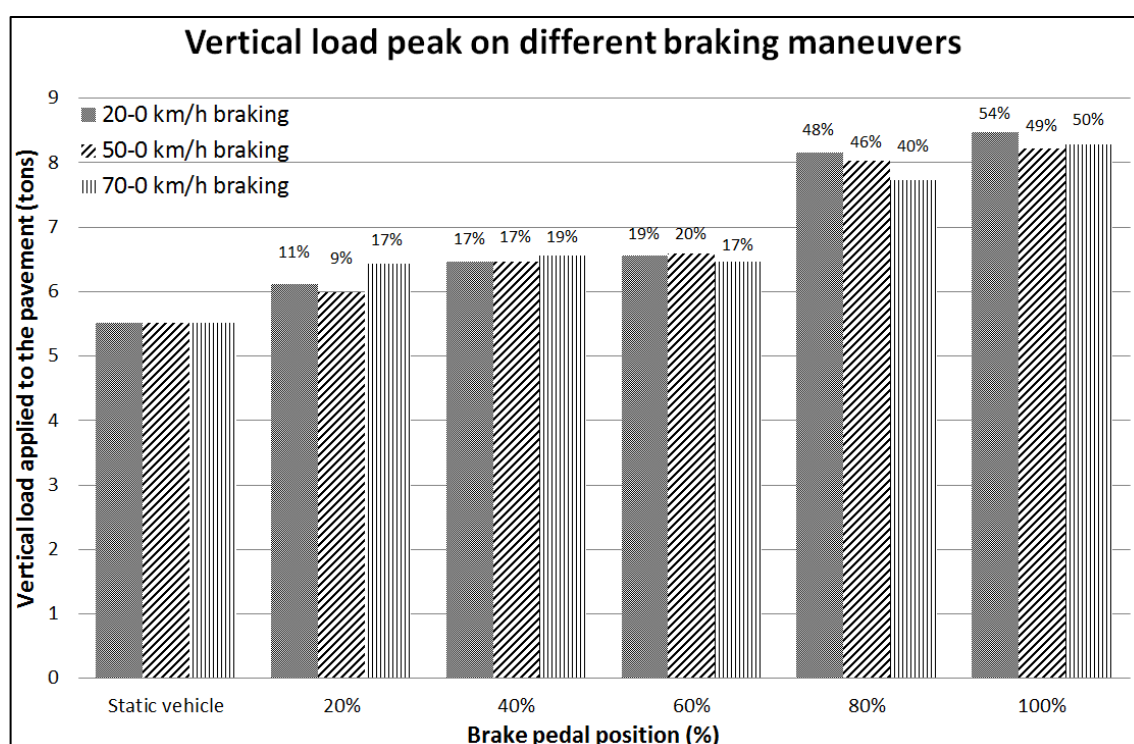


Figure 7 - Vertical peak load average on different braking maneuvers

The obtained results of peak vertical load (on the front axle) are also presented in the Table 1.

Table 1. Average of vertical peak load on different braking maneuvers.

Vehicle speed (km/h)	20	50	70
Brake Pedal Position (%)	Peak vertical load (tons)		
20	5.90	5.88	6.04
40	6.22	6.20	6.30
60	6.26	6.26	6.33
80	7.77	7.95	7.57
100	8.27	8.19	8.17

Data was evaluated for differences between columns (vehicle speed) and across rows (brake pedal position) using a bi-directional analysis of variance (ANOVA) without replication. Significance was set a priori at $p < 0.05$. When significance was observed, a Tukey's post-hoc test was used to examine specific contrasts.

Statistically significant differences were found between different brake pedal positions ($F_r(244) > F_{0,05;4;8}(3.84)$), which implies that the deceleration rate has a direct influence on the vertical load transferred to the front axle during a braking maneuver. Regarding the vehicle's initial speed (columns), the ANOVA indicates that there is no significant difference ($F_c(0.02) < F_{0,05;4;8}(4.46)$) among the tested speeds of 20, 50 and 70 km/h on the vertical load transferred.

Back to the observed difference of the brake pedal position, a post-hoc Tukey's HSD (Honest Significant Differences) test was performed to identify which specific groups differed (also with significance level equal to 0.05), the results are presented in the Table 2.

Table 1. Tukey's Honest Significant Differences

Mean difference and Tukey's HSD test (p=0.05 / Minimum significant difference = 0.32)					
Brake pedal position (%)	20	40	60	80	100
20	*	NSD (0.27)	SD (0.34)	SD (1.92)	SD (2.28)
40	*	*	NSD (0.02)	SD (1.62)	SD (1.99)
60	*	*	*	SD (1.58)	SD (1.94)
80	*	*	*	*	SD (0.46)
100	*	*	*	*	*

Note: NSD = No significant difference (Mean difference < 0.32)

SD = Significant difference (Mean difference > 0.32)

The Tukey's test indicates that the significant difference between the brake pedal position results is found when comparing results with at least one pedal position equal or above 60%. In other words, when comparing the results from small deceleration rates (or initial positions on the brake pedal) no significant difference is observed (the mean difference is equal/inferior to the minimum significant difference of 0.32).

This discrepancy noted between two ranges of the brake pedal position (lower and higher than 60%) is justified due to the brake system design. In some commercial vehicles, the Integrated Pedal Unit (IPU) is equipped with a non-limited brake valve which does not present a linear relation between brake pedal travel and applied pressure. Two different slopes of longitudinal deceleration are observed, one for low (<60%) and another for high (>60%) brake pedal travel, as indicated in Figure 8.

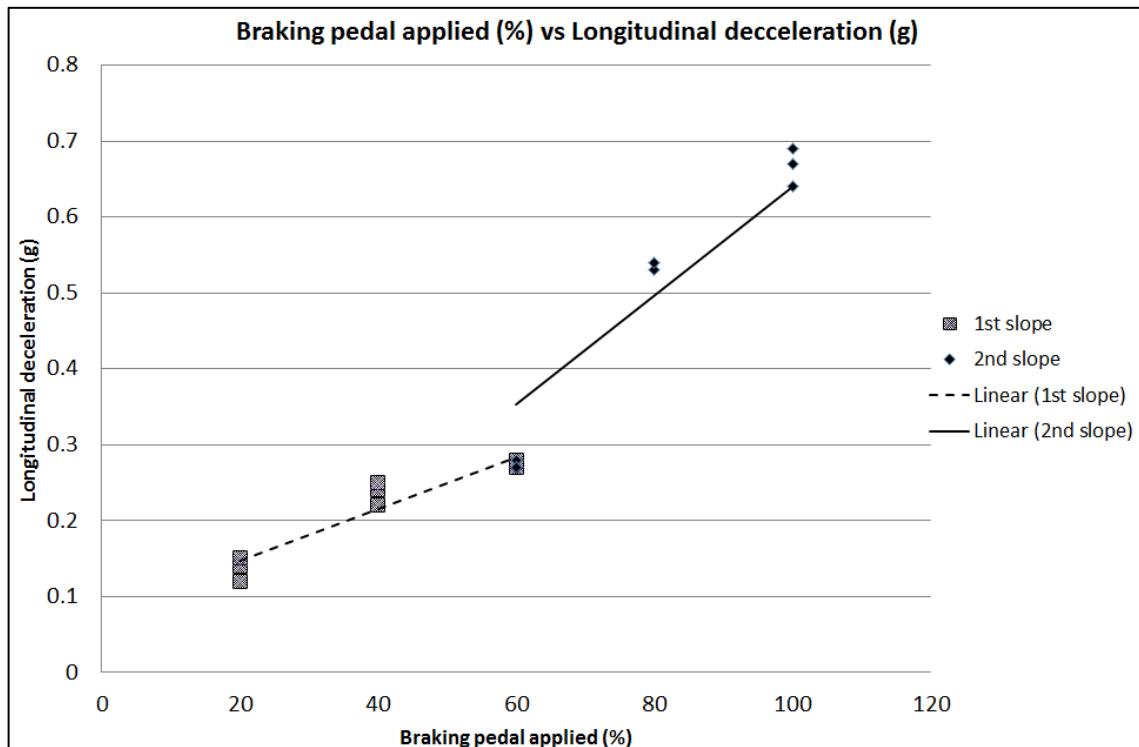


Figure 8 – Different deceleration slopes based on braking pedal travel

Conclusions

As mentioned before, there are several studies regarding the brake force applied to the pavement in the longitudinal direction (X axis), but there is a lack of research regarding vertical dynamic load during braking.

After data analysis, a conclusion can be made that the brake pedal position has a strong influence on the vertical dynamic load applied to the pavement. This statement is only valid for brake pedal position equal, or higher, than 60%. On the other hand, a vehicle's speed has no significant difference on the parameter analyzed. This means that even with low speeds of at least 60% of the brake pedal position applied, vertical loads can exceed 50% of the static load. One significant example is a truck stopping on a toll charge area. This overload during braking is an important output that should

be considered when designing of all types of roads (such as highways and city streets).

For future studies, the recommendation is to repeat the same procedure on a rigid pavement and / or pavements with different adhesion coefficients.

References

- Blundell, M., and Harty, D. (2015). The multibody systems approach to vehicle dynamics. Elsevier Ltd, Oxford, UK, 729 p.
- ECE (Economic Commission for Europe). (2012). "Uniform provisions concerning the approval of: vehicles of categories M, N and O with regard to braking." R13.
- Gillespie, T. D. (1992). Fundamentals of vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale, USA, 495 p.
- Heibing, B., and Ersoy, M. (2011). Chassis handbook: fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Berlin, Germany, 579 p.
- Kulakowski, B. T., and Chi, M., and Lin, C. (1992). Measurement and modeling of truck tire traction characteristics. J. J. Henry and J. C. Wambold, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, pp. 112-124.
- Mastinu, G., and Ploechl, M. (2014). Road and off-road vehicle: system dynamics handbook. CRC Press. Boca Raton, USA, 1663 p.
- Taheril, A., and Obrien, E. J., and Collop, A. C. (2012). "Pavement damage model incorporating vehicle dynamics and a 3D pavement surface". International Journal of Pavement Engineering. 13 (4), 374-383.
- Wang, H., and Al-Qadi, I. L. (2010). "Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking". Road Materials And Pavement Design, 11 (1), 101-121.
- Wu, J., and Liang, J., and Adhikari, S. (2014). "Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads". Journal of Traffic and Transportation Engineering. 1 (6), 439-447.

ANEXO 5

Artigo: “*Assessment of the vertical load applied to the pavement on pothole events*”, submetido ao *International Journal of Pavement Engineering*, em 15/09/2015.

Assessment of the vertical load applied to the pavement on pothole events

Pablo Kubo *

Ph.D. in Mechanical Engineering and Ph.D. Candidate in Civil Engineering (State University of Campinas)

Rua João Dembinski, 371, casa 40, Curitiba, Brazil - 81270-330

pyykubo@hotmail.com

+55 41 9114-5783

Cassio Paiva

Professor of Civil Engineering, State University of Campinas, Campinas, Brasil

Avenida Albert Einstein, 951, Campinas, Brazil - 13083-852

celpaiva@fec.unicamp.br

+55 19 3521-2343

Arthur Larocca

Mechanical Engineer, Alpha Serviços de Assessoria Técnica Ltda, Curitiba, Brasil

Rua Cláudio Manoel da Costa, 573, Curitiba, Brazil – 80520-590

arthur.larocca@outlook.com

+55 41 9905-4339

Joshua Dawson

Mechanical Engineer, Volvo Trucks North America, Greensboro, USA

National Service Road, 7900, TC 1-36, Greensboro - NC, USA – 27409

joshua.dawson@volvo.com

+1 336 339-0872

*Corresponding author

Assessment of the vertical load applied to the pavement on pothole events

Recurrent loadings, specially the vertical ones, imposed by the wheels of vehicles are assumed to deteriorate the pavement structure during its usage. Given the importance of the road transportation and its correct maintenance, the assessment of the real loads applied to the pavement proved to be a relevant subject. Based on an experimental methodology and a statistical analysis, this work quantified and evaluated the vertical loads applied to the pavement by the wheels of a commercial vehicle on potholes events. As a first experimental approach, the main objective of this study is to investigate the isolated influence of the vehicle's speed and the pothole's depth on the vertical load yielded. The results suggested that the pothole's depth is a parameter that directly influences the vertical load, while the vehicle's speed is more likely to impact in the contrasts with low velocities. Although further studies are necessary, the obtained results emphasize the importance of considering the loads imposed by transient events (such as the pothole) on the project and maintenance of the pavement roads.

Keywords: potholes; vertical load; pavement; commercial vehicles; speed

1. Introduction

Roads provide the most effective communication in means of physical transportation and attend society as routes for personal transport and movement of goods. Repeated loadings imposed by the wheels of vehicles deteriorate the pavement structure. The high wheel loads of heavy trucks, for instance, are a major source of pavement damage by causing fatigue, which leads to racking, and by permanent deformation, which produces rutting (Gillespie et al. 1992, Tiong et al. 2012). In addition, weather conditions and deficient road construction process will eventually lead to road surface irregularities. Poor or null road maintenance also affects road quality directly (Flores-Centeno et al. 2014).

The vehicle-road interaction is a very important subject on the automotive field. Besides the importance on the vehicle design process stated by Billal et al. (2015), Flores-Centeno et al. (2014) highlight the importance of road safety, which is directly associated with different

elements such as the vehicle, the driver, the environment or the infrastructure.

Within the scenario of road infrastructure, the potholes are one of the most common road irregularities. Due to the aforementioned reasons, they consist basically of the loss of material from the upper pavement layer (Figure 1).



Figure 1 – Example of a pothole on road surface.

Source: Tai, Chan and Hsu (2010).

While several works focus on the road surface monitoring for potholes recognition (Eriksson et al. 2008, Mohan et al. 2008, Koch and Brilakis 2011, Perttunen et al. 2011) and on simulations of this event (Wang and Basch 2007, Kropáč and Múčka 2008), few studies present experimental results of how potholes affect the vertical load applied to the pavement.

Cole and Cebon (1996) suggest that the fatigue failure of pavements is expected to be governed by peak dynamic forces, and not by the average loads. Then it follows that, according to Pesterev et al. (2005), for a pavement damage assessment it is critically important to establish how the peak tire forces depend on the irregularity dimensions, suspension characteristics, and vehicle speed.

In this regard, this work discusses and quantifies the vertical peak load applied to the pavement while a commercial vehicle crosses potholes of different depths and at different speeds. As a first experimental approach, the main objective of this study is to investigate the isolated influence of these parameters (vehicle's speed and pothole's depth) on the vertical load measured.

2. Methodology

2.1 Vehicle instrumentation

An 8x2 rigid truck (2 steering front axles, 1 drive axle and 1 tag axle – Figure 2) with the following specifications has been used for the measurements: 6 tons per axle on the front suspension; 295/80 R22.5 tire size and 110 psi (approx. 7.6 bar) of tire pressure.



Figure 2 – 8x2 rigid truck used for the measurements.

Uniaxial strain gauges with a full bridge setup were placed on the main leaf spring of the 1st and 2nd steering axle, on both left hand side (LHS) and right hand side (RHS) of the vehicle, as illustrated in Figure 3.

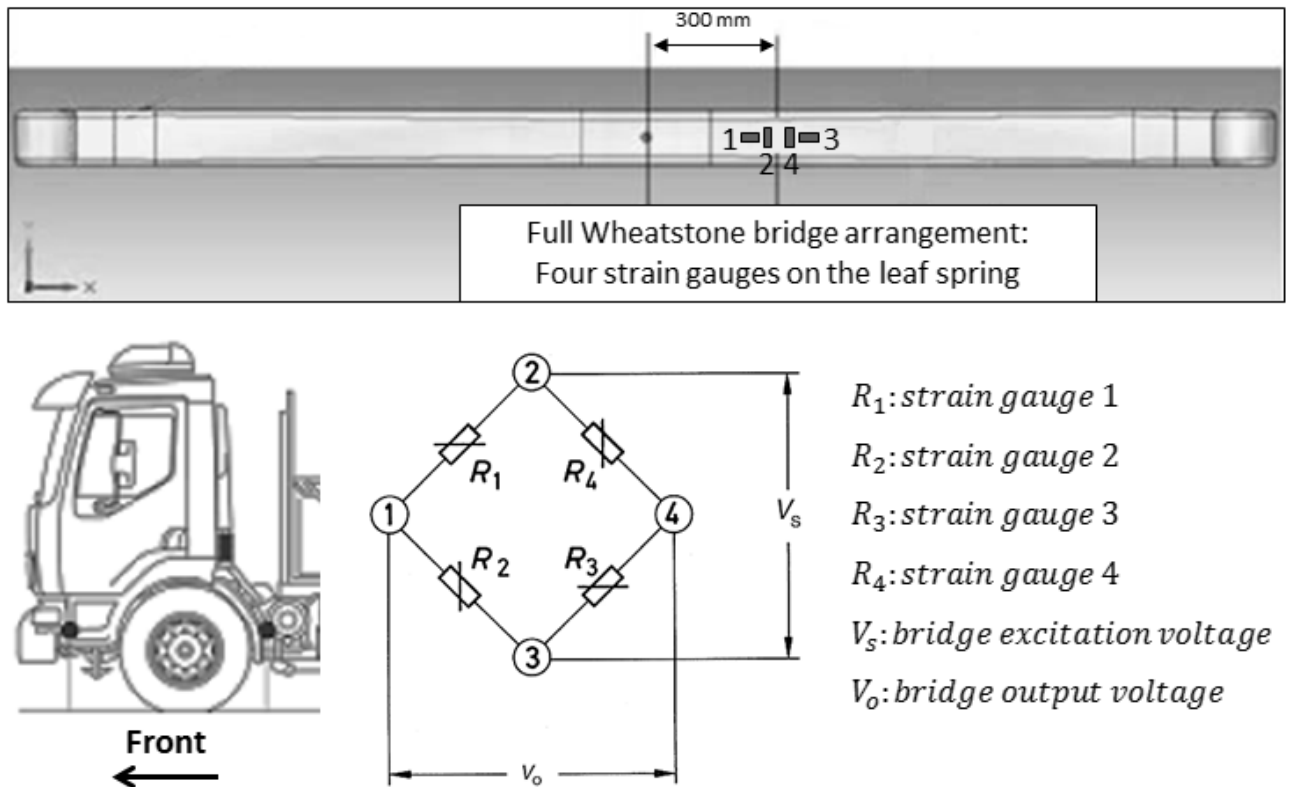


Figure 3 – Illustration of the strain gauge instrumentation on the leaf spring.

The recorded values, given by afore mentioned instrumentation, were in $\mu\epsilon$ (micro-strain). Therefore, calibration of the system was necessary to estimate the force applied to the pavement.

Utilizing known weights and a calibrated vehicle scale, calibration curves can be derived for applied load (in tons) versus $\mu\epsilon$ values (in other words, each leaf spring was used as a load cell). The coefficients of these calibration curves (Figure 4 and 5) are used during the data post-processing in order to convert the measured values, in microstrain ($\mu\epsilon$), to applied load to the pavement contact patch.

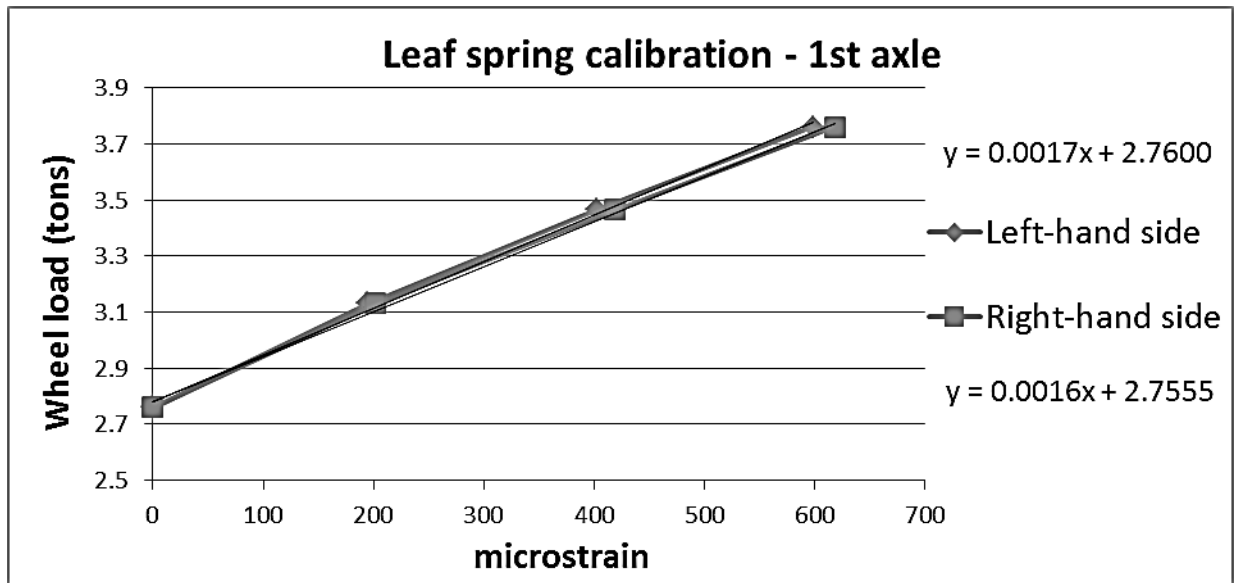
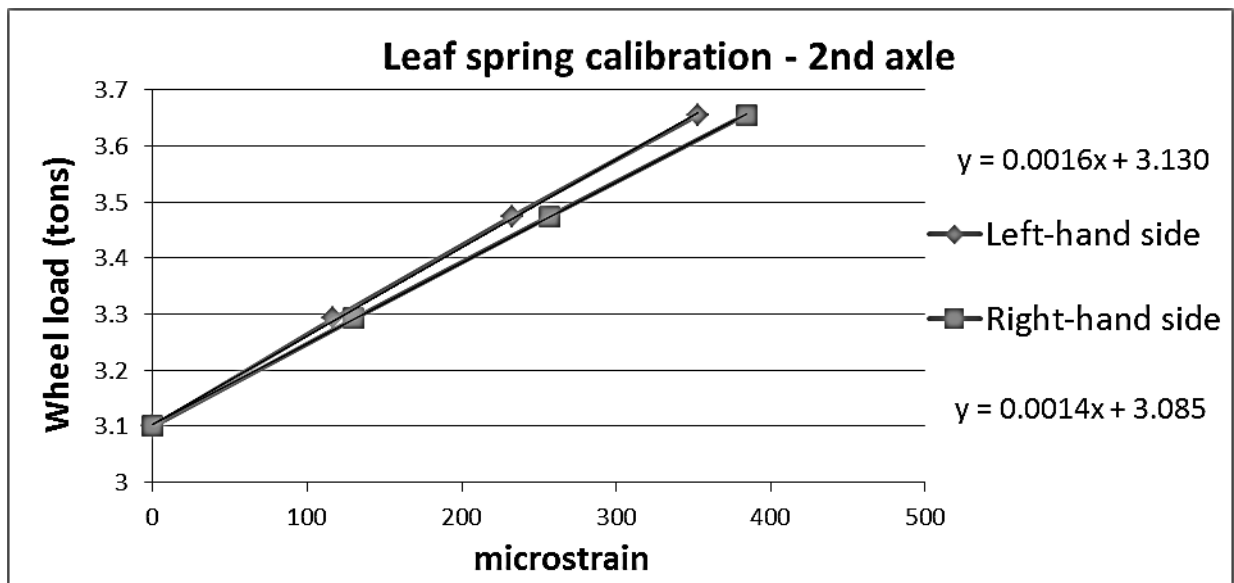
Figure 4 – Calibration of 1st axle's springs.Figure 5 – Calibration of 2nd axle's springs.

Figure 6 illustrates the complete instrumentation, data acquisition, and post-processing steps.

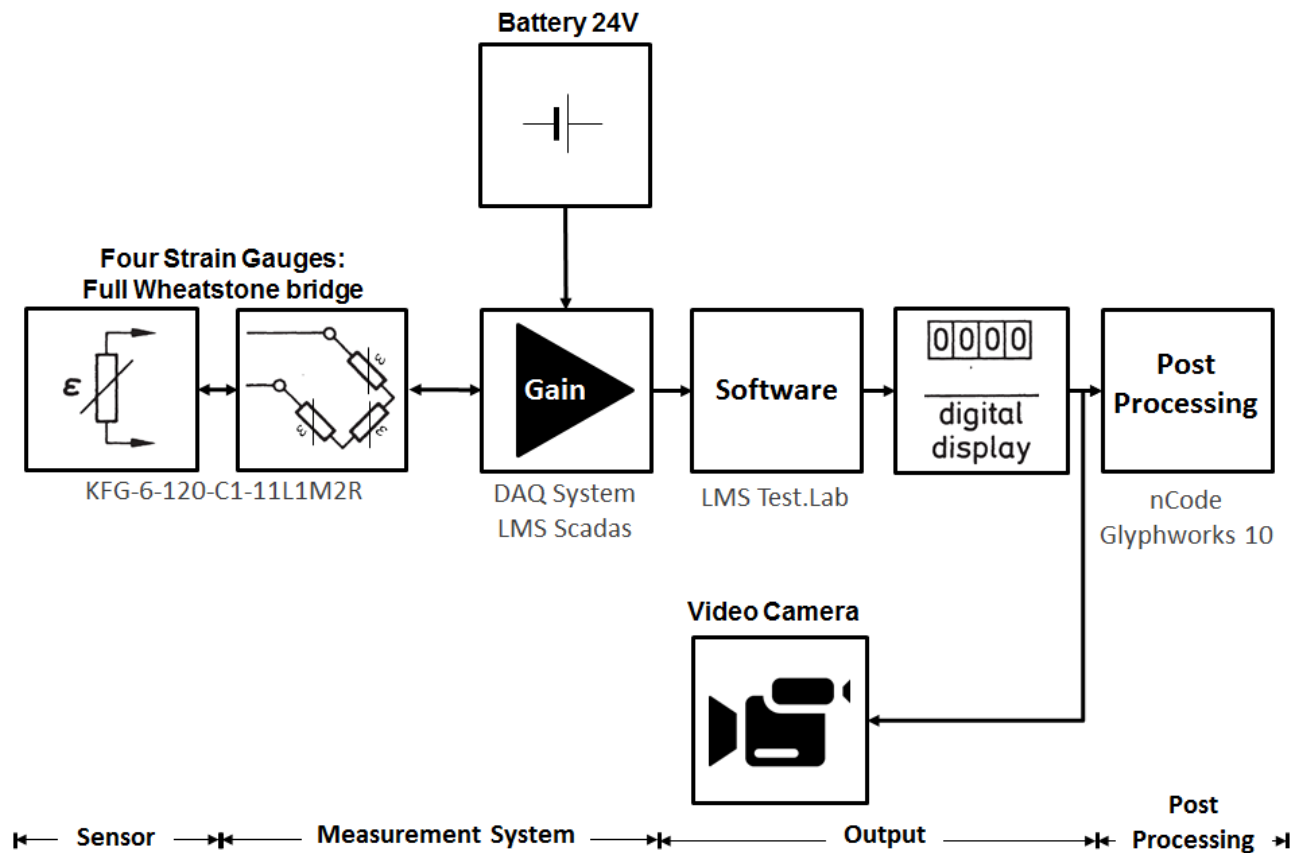


Figure 6 – Summary of instrumentation, data acquisition and post-processing.

2.2 Measurements

Measurements were performed at a closed course proving ground in the state of Rio Grande do Sul (Brazil), in order to minimize safety issues and to ensure the reproducibility of the experiment.

The test method was defined in order to evaluate the behaviour of the vertical load applied to the pavement while a commercial vehicle crosses potholes of different depths and at different speeds.

For each of the vehicle's speed (20, 30, 40 and 50 km/h), three different potholes depths (20, 40, and 80 mm – Figure 7) were tested. The measurements were repeated three times on each condition and the average peak values of the 1st and 2nd axes were analysed separately.



Figure 7 – Pothole: 1300 mm (length) x 760 mm (width) x 80 mm (depth).

2.3 Data evaluation

Data was evaluated for differences between the pothole's depths and across the different vehicle's speeds using a bi-directional analysis of variance (ANOVA) without replication. Significance was set a priori at $p < 0.05$. When significance was observed, a post-hoc Tukey's HSD (Honest Significant Differences) test was used to examine specific contrasts (also with significance level equal to 0.05). As mentioned above, the data from the 1st and 2nd axles were analysed separately in a first moment and then their main outputs were compared.

3. Results and Discussion

Despite the different tested conditions, the observed results showed similar load behaviour on both 1st and 2nd axles during the potholes events. For instance, Figure 8 presents the time-series of the vertical load on both axles while crossing an 80 mm pothole at 20 km/h.

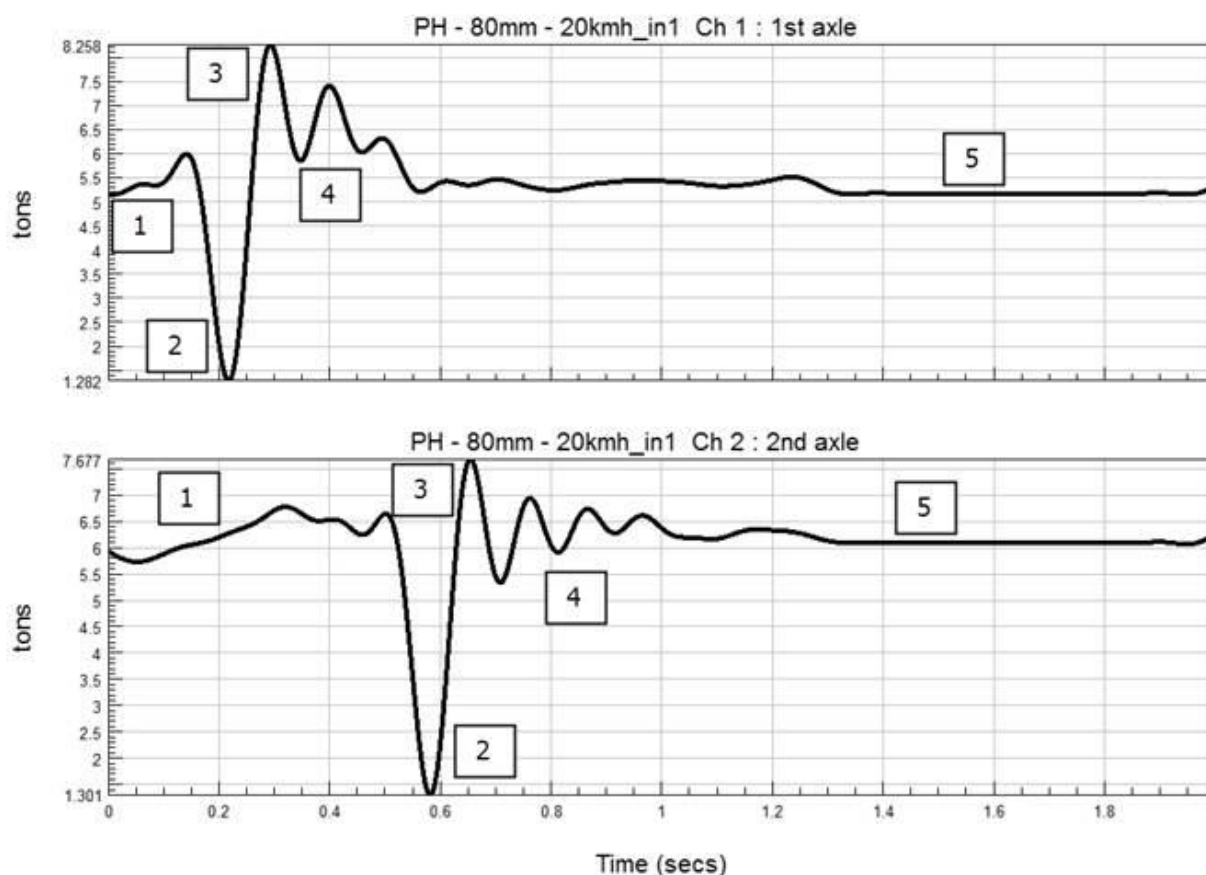


Figure 8: 1st and 2nd axles' behaviour during pothole event.

- (1) Constant speed (20 km/h);
- (2) Wheel falling in the pot hole – losing contact with the pavement;
- (3) Wheel touching the bottom/edge of the pot hole – suspension compressed;
- (4) Suspension's bounce movements;
- (5) Vehicle on steady state condition.

As it can be noted, the vertical peak loads occur in the moment that the wheels touch the bottom/edge of the pothole (3) and the vehicle's suspension is compressed. Considering the fatigue mechanism and the rainflow cycle counting procedure, described by Endo and

Matsushi (1968), this peak load is expected to be more relevant than the loads occasioned by the vehicle's bounce movements (4). In this regard, these peaks values were extracted from each measured condition and analysed separately.

3.1 Vertical load: 1st axle results

Figure 9 summarizes the obtained results (average) for the vertical peak load on the front axle due to pothole events: different vehicle speeds and different potholes depths, in comparison to the static load.

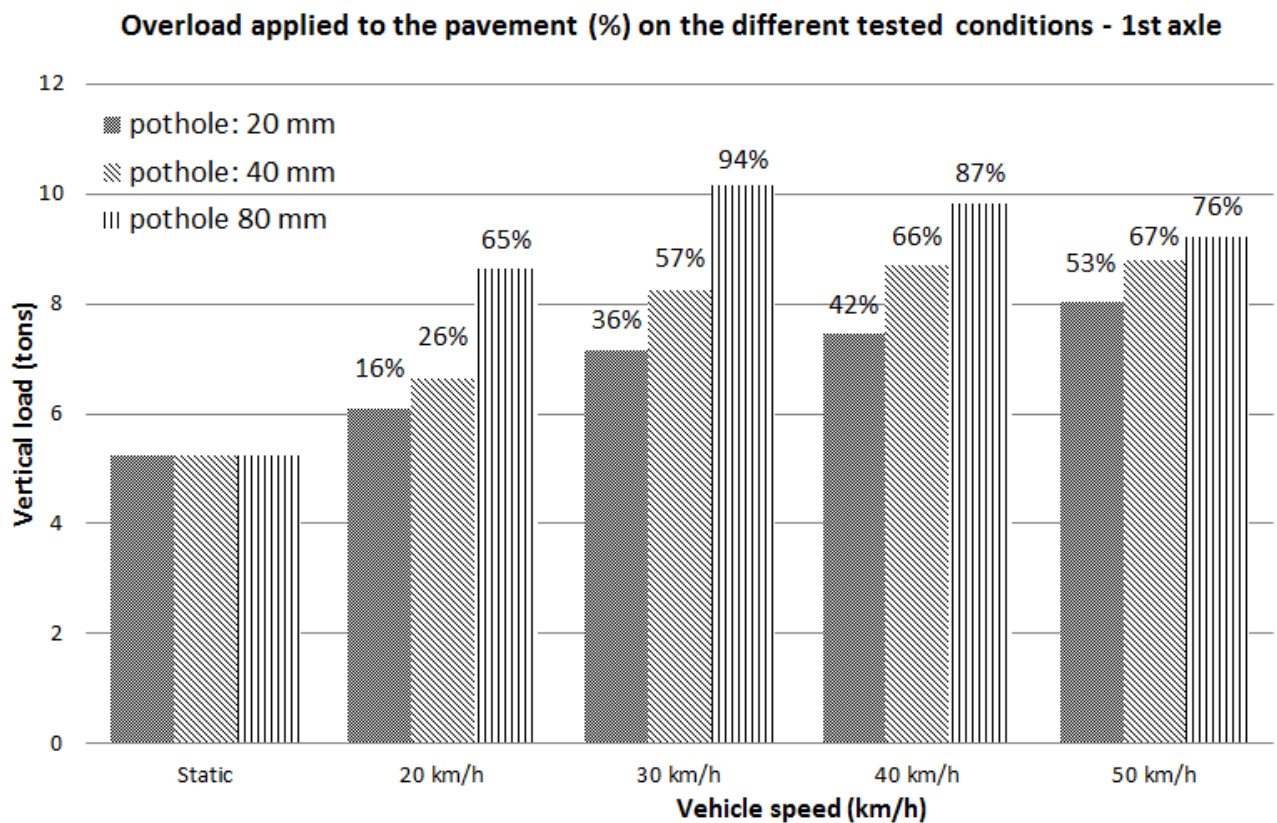


Figure 9: 1st axle vertical peak load average on different tested conditions.

Statistically significant differences were found on both tested conditions, what basically implies that both the vehicle's speed and the pothole's depth have a direct influence on the vertical load applied to the pavement while crossing a pothole.

In this regard, a post-hoc Tukey's HSD test was performed in order to identify which specific

groups differed on both conditions (pothole depth and vehicle speed). The results are presented in the Table 1 and 2 below.

Table 1 – Tukey’s Honest Significant Differences – Vehicle speed significant difference on 1st axle

Mean difference and Tukey’s test (Minimum significant difference = 1.13)				
Speed (km/h)	20	30	40	50
20	*	SD (1.40)	SD (1.55)	SD (1.34)
30	*	*	NSD (0.15)	NSD (0.06)
40	*	*	*	NSD (0.21)

NSD = No significant difference (Mean difference < 1.13)

SD = Significant difference (Mean difference > 1.13)

The Tukey’s test indicates that the significant difference between the different speeds is located when comparing results with at least one vehicle speed equal to 20 km/h (Table 1). In other words, no significant difference is observed when comparing the results between speeds of 30, 40 and 50 km/h.

Table 2 – Tukey’s Honest Significant Differences – Pothole depth significant differences on 1st axle

Mean difference and Tukey’s test (Minimum significant difference = 0.86)			
Pothole depth (mm)	20	40	80
20	*	SD (1.07)	SD (2.43)
40	*	*	SD (1.36)

NSD = No significant difference (Mean difference < 0.86)

SD = Significant difference (Mean difference > 0.86)

Regarding the different potholes evaluated, the Tukey’s test indicated that significant differences are observed between all the different depths of 20, 40 and 80 mm – Table 2.

3.2 Vertical load: 2nd axle results

Figure 10 presents the obtained results (average) for the vertical peak load on the second axle due to pothole events.

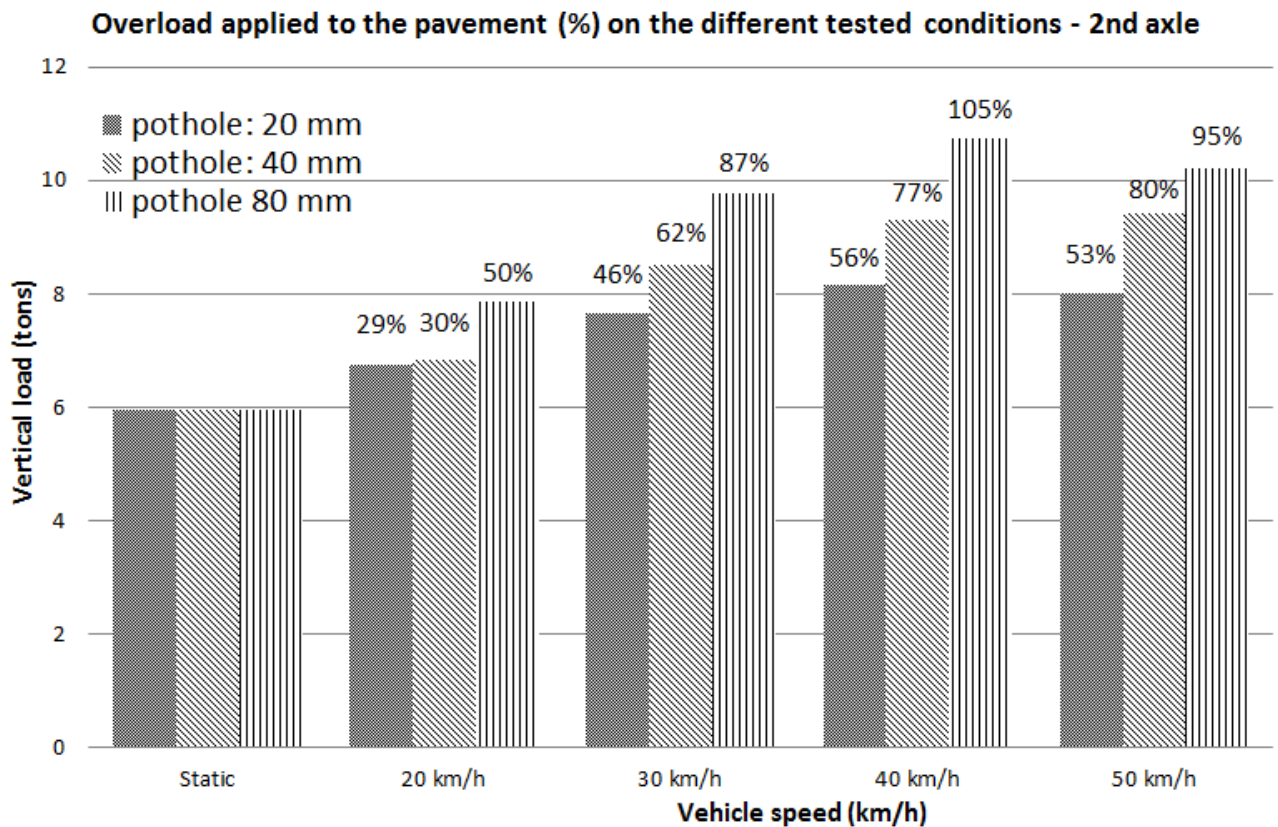


Figure 10 – 2nd axle vertical peak load average on the different tested conditions.

Like the results from the first axle, the analysis of variance (ANOVA) indicated significant differences for both vehicle's speed and pothole's depth. In this concern, Table 3 and 4 present the results of the Tukey's tests for both parameters.

Table 3 – Tukey's Honest Significant Differences–Vehicle speed significant difference on 2nd axle.

Mean difference and Tukey's test (Minimum significant difference = 1.02)				
Vehicle speed (km/h)	20	30	40	50
20	*	SD (1.50)	SD (2.25)	SD (2.08)
30	*	*	NSD (0.75)	NSD (0.57)
40	*	*	*	NSD (0.17)

NSD = No significant difference (Mean difference < 1.02)

SD = Significant difference (Mean difference > 1.02)

Table 4 – Tukey's Honest Significant Differences – Pothole depth significant difference on 2nd axle

Mean difference and Tukey's test (Minimum significant difference = 0.79)			
Pothole depth (mm)	20	40	80
20	*	SD (0.87)	SD (2.00)
40	*	*	SD (1.14)

NSD = No significant difference (Mean difference < 0.79)

SD = Significant difference (Mean difference > 0.79)

3.3 Overall results for 1st and 2nd axles

As it can be noted, matching results were obtained for both first and second axles. In sum, pothole's depth is suggested to be a parameter that directly influences the vertical load applied to the pavement, while the vehicle's speed is more likely to impact in the contrasts with low velocities.

Another important output from this evaluation is the high influence of potholes on the vertical load applied to the pavement by a commercial vehicle. The global results suggested that, on a pothole with 80 mm depth, the vertical load applied by the vehicle's wheels can reach up to twice the its static load.

4. Conclusions

Given the importance of the road transportation and its correct maintenance, the assessment of the real loads applied to the pavement come to be a relevant theme. Based on an experimental methodology and a statistical analysis, this work quantified and evaluated the vertical loads applied to the pavement by the wheels of a commercial vehicle on potholes of different depths and at different speeds.

The results suggested that the pothole's depth is a parameter that directly influences the vertical load applied to the pavement, while the vehicle's speed is more likely to impact in the contrasts with low velocities. No significant difference was observed when comparing the vertical peak loads results from the speeds of 30, 40 and 50 km/h. In contrast, the results from the Tukey's HSD test pointed that different pothole depths will yield to significant differences on the concerned vertical loads.

Apart from the influence of the vehicle's speed and pothole's depth, an overall influence of potholes on the wheels' vertical load has been observed. The global results suggested that, on a pothole with 80 mm depth, the vertical load applied by the vehicle's wheels can even exceed twice its static load.

In sum, considering the obtained results, one key output from this work is the highlighted importance of the appropriate project and maintenance of all types of pavement roads. Beyond the maximum loads defined by the country's legislation, these stages should also consider the loads imposed by transient events such as potholes.

References

- Billal, K. et al., 2015. Simulation of Vehicle Pothole Test and Techniques Used. SAE Technical Paper 2015-01-0637, doi:10.4271/2015-01-0637.
- Cole, D.J. and Cebon, D., 1996. Truck suspension design to minimize road damage, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D. Journal of Automobile Engineering*, 210, 95–107.
- Endo, T. and Matsushi, M. 1968. Fatigue of Metals Subjected on Varying Stress. In: *Japan Society of Mechanical Engineering*, 1st ed. Jukvoka: JSME, 37-40.
- Eriksson, J. et al., 2008. The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring. In: *Mobile systems, applications, and services*, ed. 6th international conference, 17-20 June 2008 Breckenridge.
- Flores-Centeno, O. et al., 2014. Effect of Road Irregularities in the Dynamic Behavior of a Heavy Vehicle. SAE Technical Paper 2014-01-2302, doi:10.4271/2014-01-302.
- Gillespie, T. D. et al., 1992. Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.
- Koch, C. and Brilakis, I., 2011. Pothole detection in asphalt pavement images. *Advanced Engineering Informatics*, 25, 507–515.
- Kropáč, O. and Můčka, P., 2008. Effect of obstacles in the road profile on the dynamic response of a vehicle. *Journal of Automobile Engineering*, 222, 353-370.
- Mohan, P. et al., 2008. TrafficSense: Rich Monitoring of Road and Traffic Conditions using Mobile Smartphones. Microsoft Research, Technical report MSR-TR-2008-59.
- Perttunen, M. et al. 2011. Distributed Road Surface Condition Monitoring Using Mobile Phones. In: *Ubiquitous Intelligence and Computing*, ed. 8th International Conference, 2-4 September 2011 Banff. Banff: UIC 2011.
- Pesterev, V. et al., 2005. Assessing tire forces due to roadway unevenness by the pothole dynamic amplification factor method. *Journal of Sound and Vibration*, 279, 817–841.
- Tai, Y. et al., 2010. Automatic Road Anomaly Detection Using Smart Mobile Device. In: *Artificial Intelligence and Applications*, ed. 15th Conference, 18-20 November Hsinchu 2010. Hsinchu: TAAI.
- Tiong, P. L. Y., Mustaffar, M. and Hainin, M. R., 2012. Road Surface Assessment of Pothole Severity by Close Range Digital Photogrammetry Method. *World Applied Sciences Journal*, 19 (6), 867–873.

Wang, D. and Basch, R., 2007. Effects of Braking on Suspension Loads in Potholes. SAE Technical Paper 2007-01-1647, doi:10.4271/2007-01-1647.

ANEXO 6

Artigo: *“Quantitative analysis of the influence of pavement longitudinal profile for a front suspension’s durability of a commercial vehicle”*, submetido ao *Canadian Journal of Civil Engineering*, em 13/10/2015.

Quantitative analysis of the influence of pavement longitudinal profile for a front suspension's durability of a commercial vehicle

Pablo Kubo *

Ph.D. in Mechanical Engineering and Ph.D. Candidate in Civil Engineering (State University of Campinas)

Rua João Dembinski, 371, casa 40, Curitiba, Brazil - 81270-330

pyykubo@hotmail.com

+55 41 9114-5783

Cassio Paiva

Professor of Civil Engineering, State University of Campinas, Campinas, Brasil

Avenida Albert Einstein, 951, Campinas, Brazil - 13083-852

celpaiva@fec.unicamp.br

+55 19 3521-2343

Ari Nardello

M.Sc. in Vehicle Dynamics and Ph.D. Candidate in Mechanical Engineering (Federal University of Rio Grande do Sul)

Rua Mario João Beviláqua 672, Caxias do Sul, Brazil – 95032-240

aluisiodeambrosio@hotmail.com

+55 54 9166-7593

Arthur Larocca

Mechanical Engineer, Alpha Serviços de Assessoria Técnica Ltda, Curitiba, Brasil

Rua Cláudio Manoel da Costa, 573, Curitiba, Brazil – 80520-590

arthur.larocca@outlook.com

+55 41 9905-4339

Abstract: This paper is concerned with the evaluation of the dynamic forces, and their respective damage, that arise after the passage on different pavement longitudinal profiles by a commercial vehicle. The main objective of this research is to assess the relationship between the pavement longitudinal profiles, based in the International Roughness Index (IRI), and the damage on a commercial vehicle's front suspension. In this regard and with an instrumented truck, measurements were performed in a total of 174 km of pavements with different maintenance conditions. The damage results on the truck's front suspension indicated well defined ranges of IRI's, which could be compared to previous values used to characterize good, regular and bad pavement conditions in the literature. Moreover, the obtained results indicated (and quantified) that the pavement condition has a great influence on the durability of the truck's front suspension.

Keywords: pavement longitudinal profile; IRI; vertical load; commercial vehicle; damage.

1. INTRODUCTION

The assessment of the dynamic interactions between heavy commercial vehicles and road pavements, as the study of pavement damaging effects, has progressively increased since about 1980 (Prem, George and John McLean 1998). As heavy trucks are increasing in the diversity of their design and use (new configurations, new suspensions, new tire types), many variables of the pavement affect the behaviour of the truck and the response from the roadway structure. These include such properties as the construction material, environmental factors, geometry, traffic mix and surface roughness. In this regard, a need exists for procedures and techniques to identify possible improvements to both vehicles and pavements, with an overall objective of achieving a net gain in road transport system safety, productivity and efficiency (Gillespie *et al.* 1992).

The paper is concerned with the evaluation of the dynamic forces, and their respective damage, that arise after the passage on different pavement longitudinal profiles by a commercial vehicle. The relevance of this problem follows from the fact that typical road surface irregularities can result in large dynamic forces, which, in turn, considerably cause damage to the infrastructure (Pesterev *et al.* 2005) and to the vehicles. In this concern, the objective of this research is to assess the relationship between the pavement longitudinal profiles, based in the International Roughness Index (IRI), and the damage on a commercial vehicle's front suspension.

Although some studies indicate that roughness can be modelled as a zero mean Gaussian isotropic random field in spatial domain (Newland 1984; Zhu 1992) and others present simulated results of quarter-trucks models (Sun and Dend 1998), the Authors believe that the experimental approach still plays an important role for considering conditions of the traffic,

transient events (such as speed bumps, braking, cornering), vehicle velocity and real suspension and tire characteristics.

1.1 The International Roughness Index

Road roughness is gaining increasing significance as an indicator of road condition, both in terms of road pavement performance, and as a major determinant of road user costs (Sayers, Gillespie and Paterson 1986). The International Roughness Index (IRI) is a scale for roughness based on the response of a generic motor vehicle to roughness of the road surface. Its true value is determined by obtaining a suitably accurate measurement of the profile of the road, processing it through an algorithm that simulates the way a reference vehicle would respond to the roughness inputs, and accumulating the suspension travel (Gillespie 1992). While Bernucci et al (2010) classify the pavement condition according to the IRI ranges presented in Table 1, Sayers, Gillespie e Peterson (1986) propose the correlation presented in Figure 1.

Table 1 – Correlation between pavement condition and IRI - Bernucci et al (2010).

Pavement condition	IRI (m/km)
Good	1,0 – 3,5
Regular	3,5 – 4,5
Bad	> 4,5

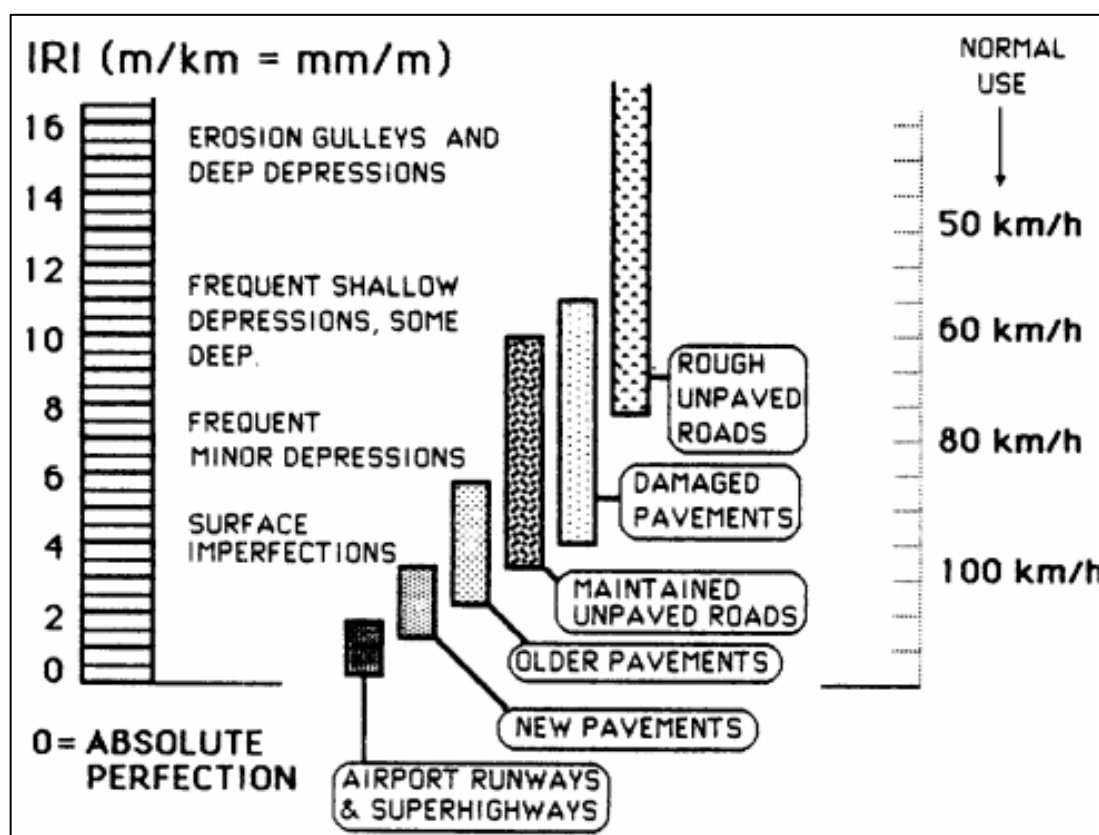


Figure 1 – Correlation between pavement condition and IRI - Sayers, Gillespie and Peterson (1986)

1.2 Relative damage theory

As structures and mechanical components are regularly subjected to oscillating loads and fatigue is one of the major causes in component failures, fatigue life prediction has become a relevant subject (Liou, Wu and Shin 1999).

If a test specimen is subjected to a sufficiently severe cyclic stress, a fatigue crack or other damage will develop, resulting in the complete failure of the component/system (Downling 2012). The data of the different loading levels can be presented by a stress-life curve, or Wöeler curve (Figure 2).

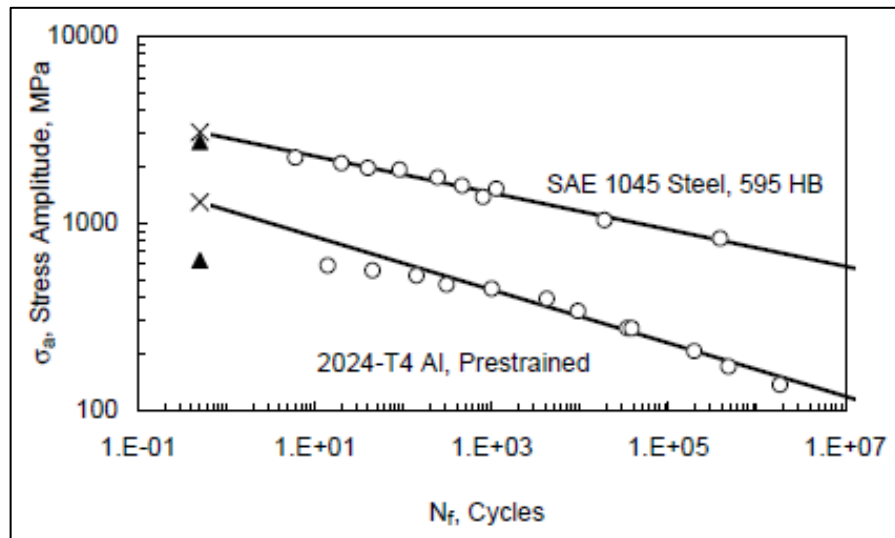


Figure 2 – Example of two stress-life curves (Downling 2004)

The above-mentioned curve is defined through controlled samples that are tested until its complete failure with a constant frequency/amplitude sinusoidal load (Figure 3).

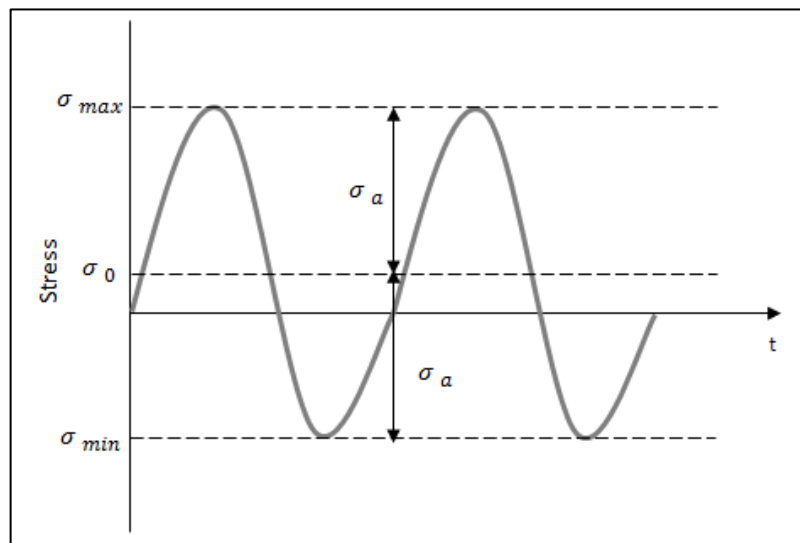


Figure 3 – Example of a sinusoidal load (Adapted from: Barboza, Raminell and Antonelli 2005)

Through a stress-life curve, it is possible to determine the number of cycles for failure in a given signal with constant load. Unfortunately, only few applications show such behaviour. In this concern, Palmgren suggested the following equation:

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = \sum \frac{N_j}{N_{fj}} = 1 \quad (1)$$

Where:

N_j : number of cycles for each constant load;

N_{fj} : number of cycles (failure) from stress-life curve, for each constant load.

Basically, Palmgren states that a component will fail when the sum of the ratio between the number of cycles, for each segment, and the number of cycles from stress-life curves, is equal to 1 (Figure 4). Moreover, the damage, represented by those ratios, occurs and accumulates only when the stress is higher than the fatigue limit (Zhu, Huang and Wang 2011).

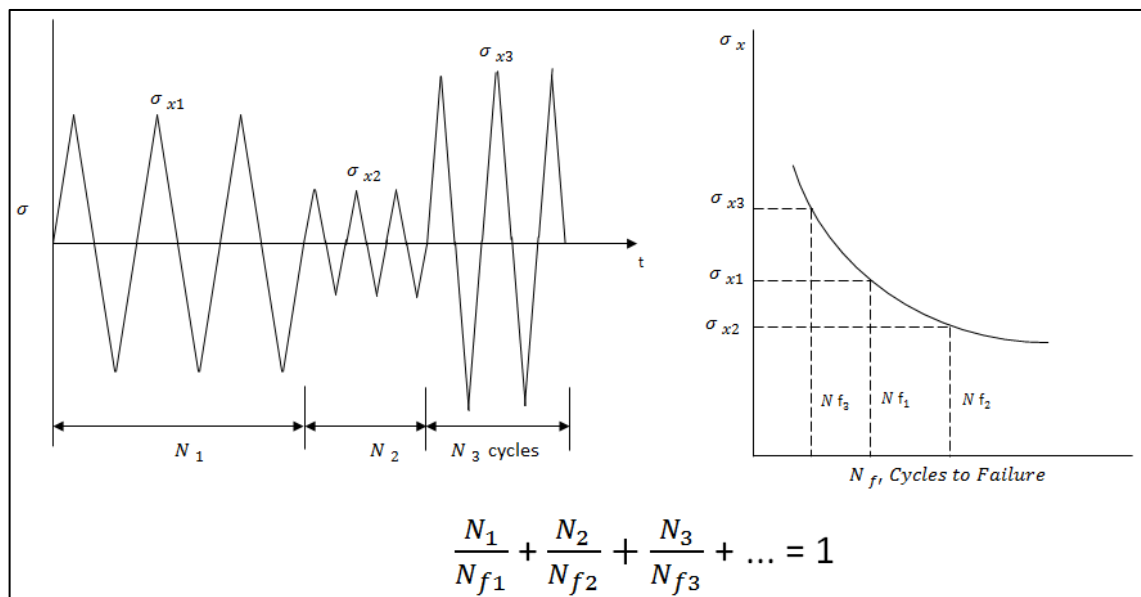


Figure 4 – Palmgren rule (Adapted from: Downing 2012)

This author (Palmgren) created this concept early in 1920, but it has been spread worldwide by Miner (Miner 1945), and, due to that, it was named as the Palmgren-Miner rule.

On the other hand, Dowling highlights that for loads with high variation levels (Figure 5), it is not feasible to do the calculation as stated by Palmgren-Miner.

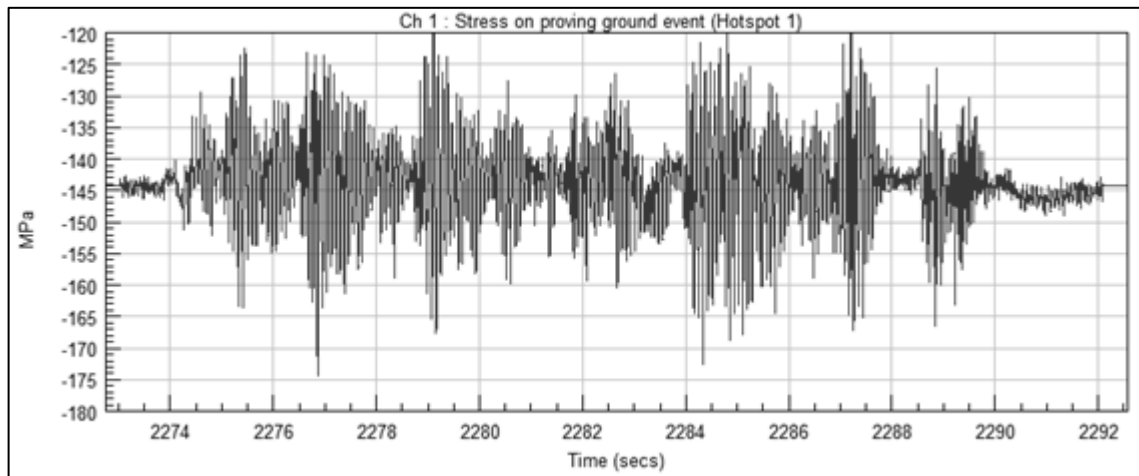


Figure 5 – Example of a time signal with high variation level

In this way, it is necessary to adopt a procedure called rainflow cycle counting, created by Endo and Matsushi (1968). This analysis considers a cycle counting, if it follows the criteria from Figure 6.

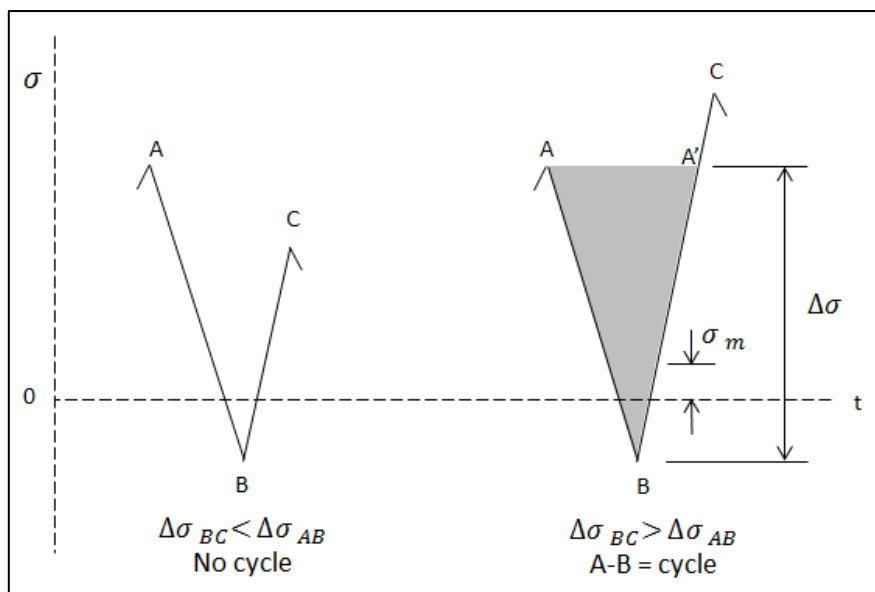


Figure 6 – Principle of rainflow cycle counting (Adapted from: Downing 2012)

With the combination of the peak-valley-peak “A-B-C” (Figure 6) it will be considered a cycle, if the amplitude variation, $\Delta\sigma_{bc}$, is equal to or greater than the previous amplitude variation (Endo and Matsushi 1968).

Finally, using the concepts from Palmgren-Miner/Endo and Matsushi, it is possible to define the following equation for the absolute damage:

This material may be downloaded for personal use only.

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} \quad (2)$$

Where:

σ_a : average amplitude from each rainflow cycle (σ_{max} e σ_{min});

σ_{max} : max amplitude (peak) of each rainflow cycle;

σ_{min} : min amplitude (valley) of each rainflow cycle.

$$N_{fj} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{\sigma_{max} \cdot \sigma_a}}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3)$$

Where:

N_{fj} : number of cycles (failure) from stress-life curve, for each constant load;

σ'_f : theoretical loading that indicates failure with zero cycle (material property);

b : stress-life curve slope (material property).

$$absolute\ damage = \sum \frac{N_j}{N_{fj}} \quad (4)$$

Lastly, relative damage is defined as the ratio between the absolute damage of two different load histories:

$$relative\ damage = \frac{absolute\ damage_1}{absolute\ damage_2} \quad (5)$$

2. METHODOLOGY

An 8x2 rigid truck (2 steering front axles, 1 drive axle and 1 tag axle – Figure 7) with the following specifications has been used for the measurements: 6 tons per axle on the front suspension, 295/80 R22.5 tire size, parabolic front spring (210 N/mm of stiffness) and 110 psi (approx. 7.6 bar) of tire pressure.



Figure 7 – 8x2 rigid truck used for the measurement

For the IRI measurements, it has been installed an inertial laser profilometer on the front bump of the tested truck, in order to better synchronize the results from the vertical load applied to the pavement – Figure 8.



Figure 8 – Inertial laser profilometer installed in the tested truck

The vertical load, applied to the pavement by the truck's front axle (and used as reference for the damage calculation), was measured by using the vehicle's front springs. Uniaxial strain gauges, on a full Wheatstone bridge arrangement, were placed on the main leaf spring of the first and second steering axes, on both left hand side (LHS) and right hand side (RHS), as illustrated in Figure 9. By utilizing known weights and a calibrated vehicle scale, calibration curves were defined so the value of the strain – from the strain gauges – could be correlated with the vertical load applied to the pavement (in tons).

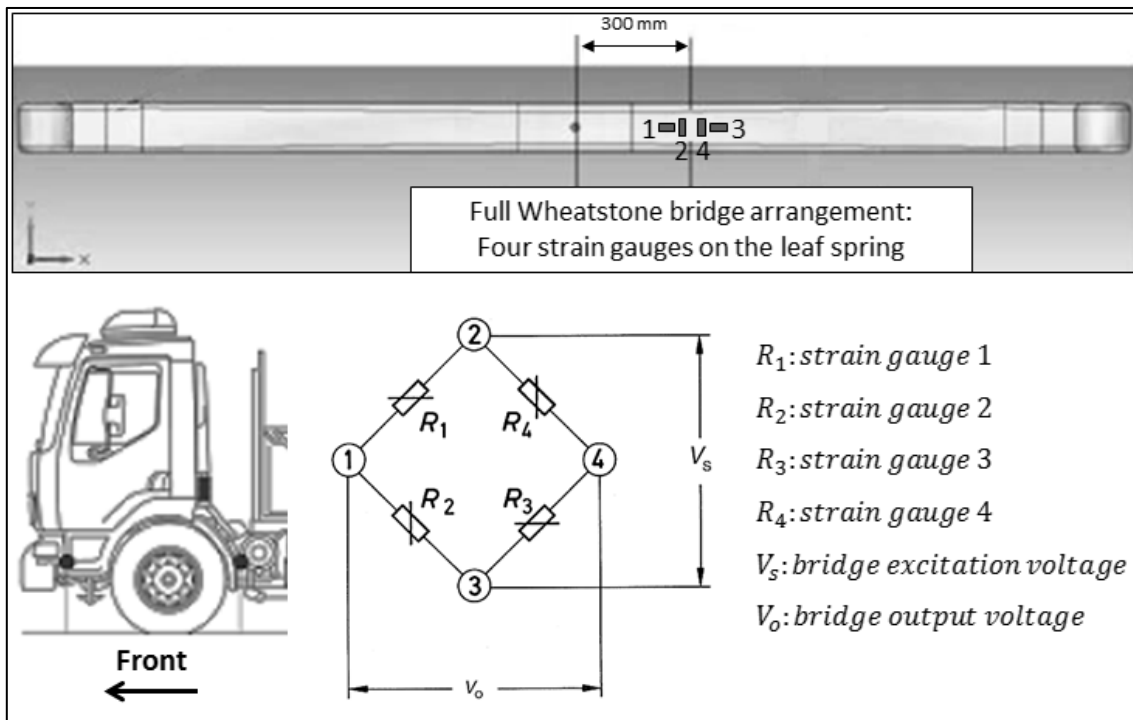


Figure 9 – Illustration of the strain gauge instrumentation on the leaf spring

Besides the vertical load applied to the pavement and the IRI values, other signals have been recorded in order to better correlate the data. The vehicle speed and distance were recorded through the vehicle CANBus (vehicle communication protocol which has general information of the vehicle); a GPS (global positioning system) antenna and a camera recorder were placed on the vehicle as well. A triaxial accelerometer was installed on the vehicle's front axle in order to verify cornering, braking and road slopes in the data post-processing.

All signals were recorded simultaneously on the data acquisition system. Figure 10 illustrates the complete instrumentation, data acquisition, and post-processing steps of this methodology.

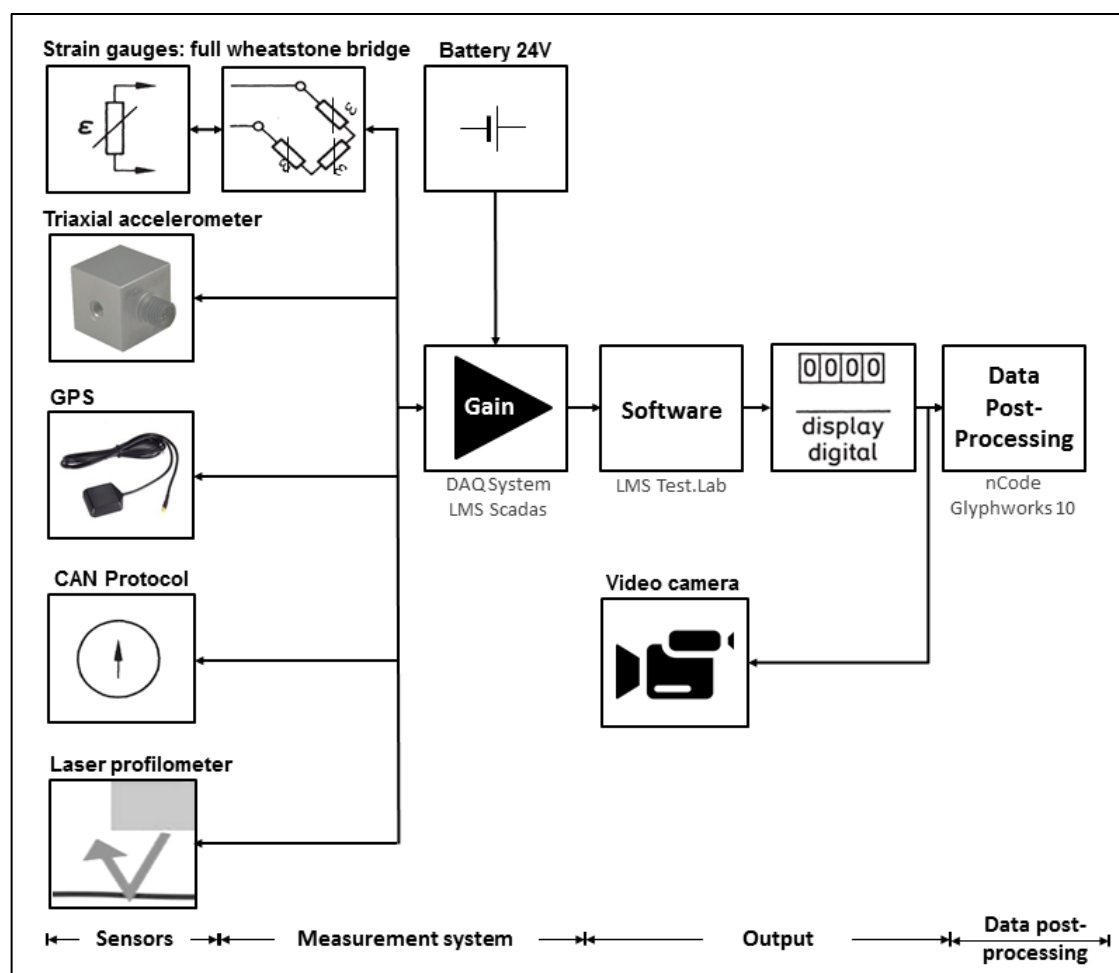


Figure 10 – Summary of instrumentation, data acquisition and data post-processing

The measurements were performed on access, collector and arterial roads located in two Brazilian cities (Curitiba - PR and Caxias do Sul - RS). It has been measured a total of 174 km of pavements with different maintenance conditions.

3. RESULTS

The damage caused by the pavement on the primary front suspension of a truck is plotted on the chart below (Figure 11) as a function of the pavement's IRI – the baseline (100%) is

considered the lowest damage value. Despite the scattering of the data, it is noticed clear differences among the IRI values, as between the following ranges:

- $1 < \text{IRI} < 2$
- $2 < \text{IRI} < 4.5$
- $\text{IRI} > 4.5$

Those ranges are close to the ones proposed by Sayers, Gillespie and Peterson (1986) in terms of new, old and damaged pavements.

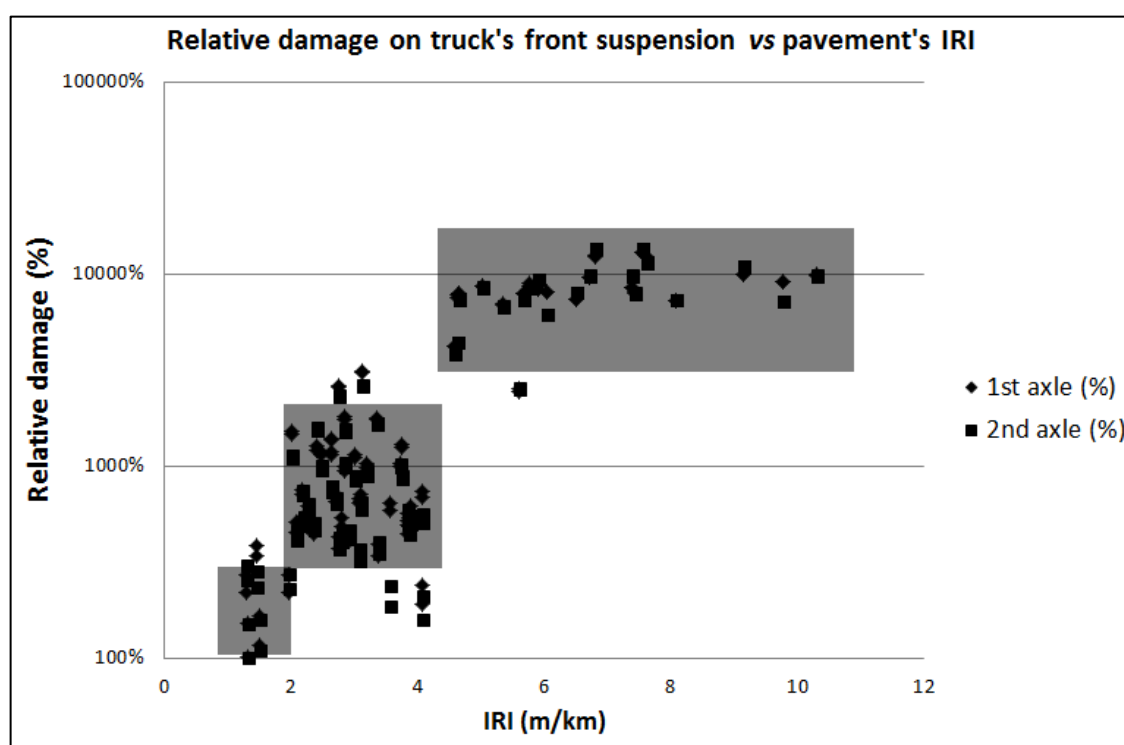


Figure 11 – Relative damage on truck's front suspension according to pavement's IRI

The chart in Figure 11 presents the results of the unfiltered measurements, on normal traffic conditions and considering all the transient events.

Differently from Figure 11, Figure 12 presents the relative damage measured on controlled conditions such as: no braking; no cornering and at a constant vehicle speed. Those

parameters were identified in the post-processing step by analyzing the accompanying signals, such as the CAN Bus data and the acceleration results.

The results on these controlled conditions are presented on the chart below. As indicated in Figure 12, general equations could be defined according to the IRI value.

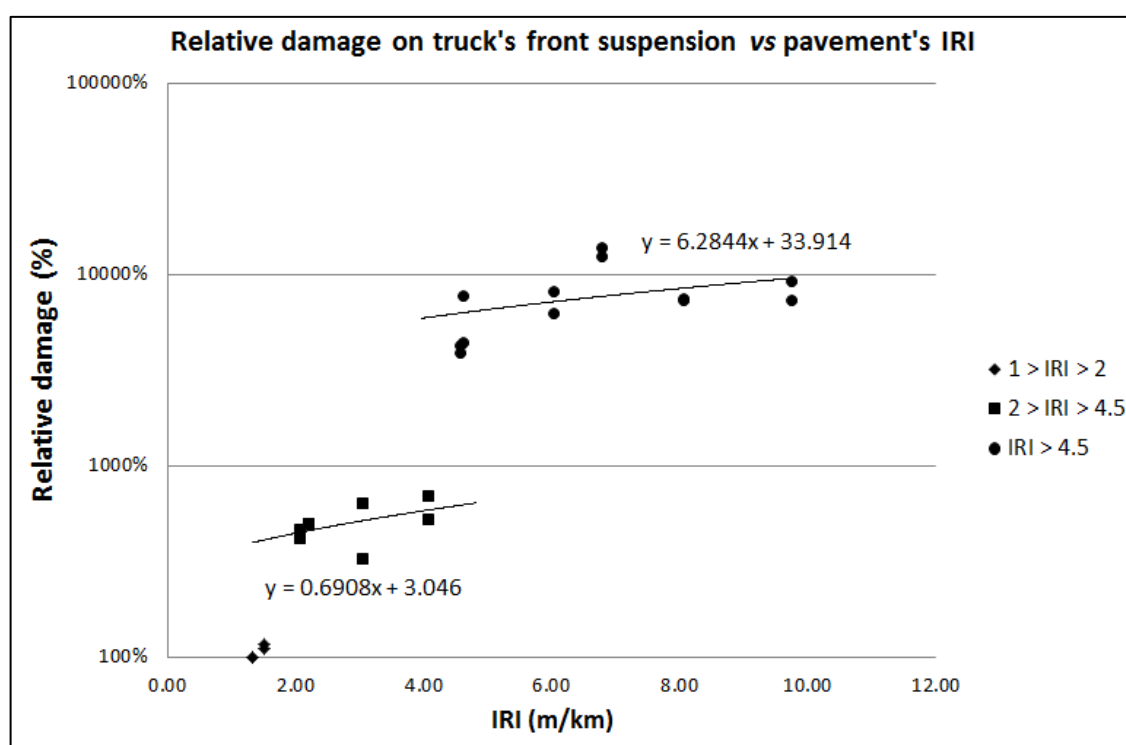


Figure 12 – Relative damage according to pavement's IRI in controlled conditions

By removing the mentioned transient events, which would lead to differences on the vertical load applied to the pavement, the results suggest well defined assessments of the influence of the pavement's IRI on the relative damage on the truck's front suspension. Compared to the raw data in Figure 11, although the same IRI ranges can be observed in Figure 12, the results from the controlled parameters present less scattering and the expected outcome that the higher the IRI value, the more damage will be caused on the vehicle.

Moreover, in order to verify the influence of the braking events on the calculated damage, braking events (as the example in Figure 13) were added on extractions of the original

measurement. In this concern, three extractions with different IRI's values were chosen: 1.33 m/km, 2.08 m/km and 6.04 m/km.

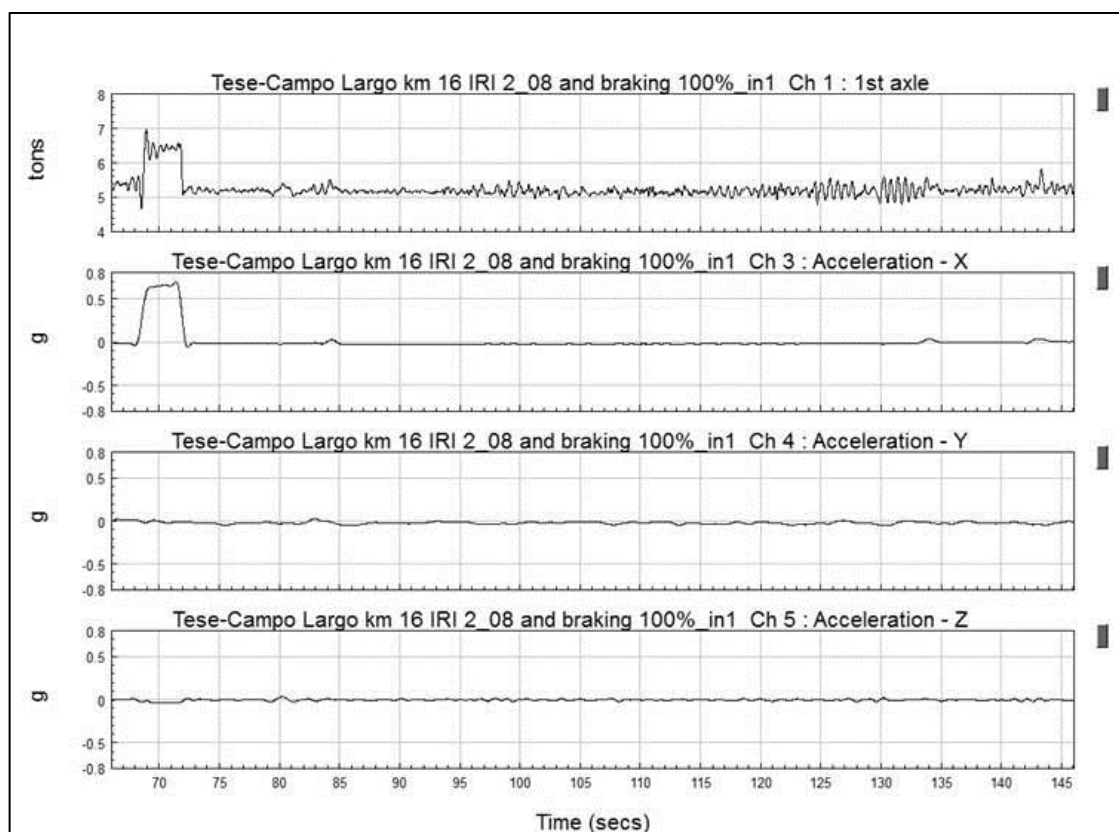


Figure 13 – Example of braking event added to the original signal

The Table 2 presents the results of the influence of the different braking manoeuvres (different travels applied to the pedal) on the increase of the relative damage on the truck's front suspension.

Table 2 – Influence of braking events on the relative damage on truck's front suspension

IRI	Using equation	No brake pedal applied	20% brake pedal	40% brake pedal	60% brake pedal	80% brake pedal	100% brake pedal
1.33	Baseline	100%	150%	412%	721%	1652%	2356%
2.08	448%	458%	480%	579%	803%	2344%	4484%
6.04	7187%	8029%	8134%	8248%	8487%	10119%	12593%

Same procedure was adopted for cornering events, but no changes were observed in the damage value. This can be explained due to the fact that mean stresses were lower than the vertical load already measured with the given IRI.

It is important to highlight that the data with IRI 2.08 had a good correlation between the acquired data and the proposed equation to quantify the damage. The track with IRI equal to 6.04 presented a difference between those two values, due to the fact that some braking events occurred during the measurement, which increased the damage, in comparison to the theoretical value.

Finally, by plotting all the applied brake pedal values – Figure 14 – on the original chart in Figure 11, it can be stated that the measured tracks, on regular traffic conditions, is fitted on the boundaries defined by braking events, which also corroborates with the proposed general equations.

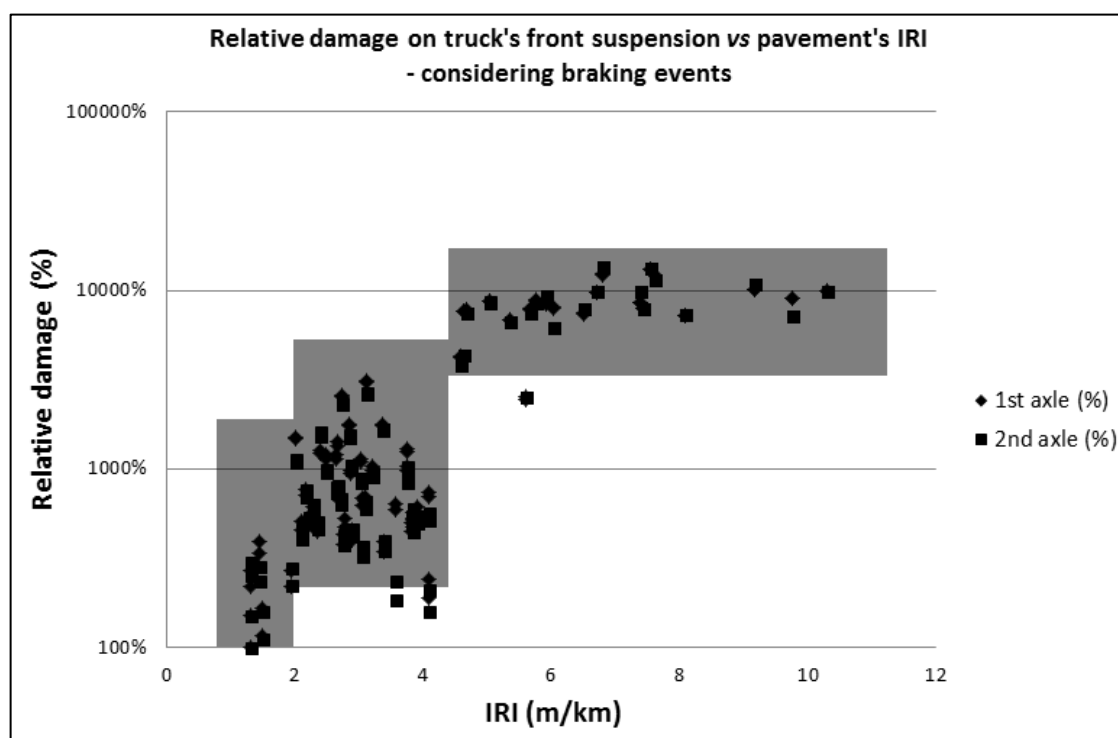


Figure 14 – Relative damage according to pavement's IRI considering braking events.

4. CONCLUSIONS

The damage results for the truck's front suspension clearly indicate range of IRI's, in comparison to the severity of the application for the vehicle. Those values are similar to the ones proposed by Bernucci et al (2010).

The Table 3 presents the differences on the IRI's ranges, with those found on the literature.

Table 3 – Pavement condition and IRI: results comparison with Bernucci et al (2010).

Pavement condition	IRI (m/km)	
	Literature	Data from measurements
Good	$1 < \text{IRI} < 3,5$	$1 < \text{IRI} < 2$
Regular	$3,5 < \text{IRI} < 4,5$	$2 < \text{IRI} < 4,5$
Bad	$\text{IRI} > 4,5$	$\text{IRI} > 4,5$

Another outcome that must be emphasized is that cornering events don't generate significant damage for the truck's suspension, differently from the braking events, which present high load transferring values. In this way, it is important to highlight that the influence of the brake pedal will be more relevant for low IRI values, due to the fact that damage calculation is more sensitive for higher loads.

Table 4 presents the severity for the truck's front suspension on each proposed IRI range.

Table 4 – Severity for the truck's front suspension on each proposed IRI range.

Pavement condition	IRI range	Severity for the truck's suspension
Good	$1 < \text{IRI} < 2$	Baseline
Regular	$2 < \text{IRI} < 4,5$	443 to 615 %
Bad	$\text{IRI} > 4,5$	> 6219 %

Through Table 4 it is possible to conclude that the pavement conditions have great influence on the durability of the truck's front suspension. In this way, a road with regular pavement condition will be up to 6 (six) times more severe than another one with good conditions. If compared to a road with bad pavement condition, this value would increase to 62 (sixty two) times.

REFERENCES

- Bernucci, L. A. et al. 2010. Pavimentação Asfáltica: formação básica para Engenheiros. 3. ed. Petrobras, Abeda., Rio de Janeiro, R.J.
- Downling, N. E. 2012. Mechanical behavior of materials: engineering method for deformation, fracture and fatigue. 4. ed. Pearson, Nova Jersey, N.J.
- Endo, T. and Matsushi, M. 1968. Fatigue of Metals Subjected on Varying Stress. *In*: Japan Society of Mechanical Engineering, 1st ed. Jukvoka: JSME, 37-40.
- Gillespie, T. D. 1992. Everything You Always Wanted to Know about the IRI, But Were Afraid to Ask!. *In* Proceedings of the Road Profile Users Group Meeting, Lincoln, Nebraska., 22–24 September 1992.
- Gillespie, T. D. et al., 1992. Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Miner, M. A. 1945. Cumulative Damage in Fatigue. Journal Of Applied Mechanics, **12**(3): 159-164.
- Newlend, D. E. 1984. An introduction to random vibration and spectral analysis, 2. ed. Longman., New York, N.Y.
- Prem, H., Rod, G. and McLean, J. 1998. Methods for evaluating the dynamic-wheel-loading performance of heavy commercial vehicle suspensions. *In* International symposium on heavy vehicle weights and dimensions, 5th, Queensland, Australia., March 29 – April 2 1998.
- Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Paterson, W. D. O. 1986. Guideline for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. The World Bank, Technical Paper 46, Washington, D. C.
- Sun, L. S. and Deng, X. 1998. Predicting Vertical Dynamic Loads Caused by vehicle-pavement interaction. Journal of Transportation Engineering, **124**: 470-478.
- Zhu, W. Q. 1998. Random vibration. Scientific Press, Beijing, People's Republic of China, 72-79.